

# PANORAMA 2025 DES BATTERIES

Auteur : Léon Chelli – Rapport technique structuré

<b>Partie I : Batteries actuellement commercialisées</b>	<b>6</b>
1. <i>Lithium-ion NMC</i>	6
Informations de base	6
Composition chimique et principe de fonctionnement	6
Réactions électrochimiques simplifiées	6
Performances typiques	6
Défis techniques	7
Progrès récents	7
Applications industrielles	7
2. <i>Lithium-ion LFP</i>	7
Informations de base	7
Composition chimique & principe de fonctionnement	7
Réactions électrochimiques simplifiées	8
Performances typiques	8
Défis techniques	8
Progrès récents	8
Applications industrielles	8
3. <i>Lithium-ion LCO</i>	9
Informations de base	9
Réactions électrochimiques simplifiées	9
Performances typiques	10
Défis techniques	10
Progrès récents	10
Applications industrielles	10
4. <i>Lithium-titanate (LTO)</i>	10
Informations de base	10
Composition chimique & principe de fonctionnement	11
Réactions électrochimiques simplifiées	11
Performances typiques	11
Défis techniques	11

Progrès récents	11
Applications industrielles	12
<b>5. Plomb-acide (AGM, Gel)</b>	<b>12</b>
Informations de base	12
Composition chimique & principe de fonctionnement	12
Réactions électrochimiques simplifiées (décharge)	12
Performances typiques	12
Défis techniques	13
Progrès récents	13
Applications industrielles	13
<b>6. Nickel-Metal Hydride (NiMH)</b>	<b>13</b>
Informations de base	13
Composition chimique & principe de fonctionnement	13
Réactions électrochimiques simplifiées (décharge)	14
Performances typiques	14
Défis techniques	14
Progrès récents	14
Applications industrielles	14
<b>Tableau comparatif – Batteries actuellement utilisées</b>	<b>15</b>
<b>PARTIE II – Technologies avancées et en cours de déploiement</b>	<b>16</b>
<b>1. Lithium-soufre</b>	<b>16</b>
Informations de base	16
Composition chimique & principe de fonctionnement	16
Réactions électrochimiques simplifiées (décharge)	16
Performances typiques	16
Défis techniques	17
Progrès récents	17
Applications industrielles	17
<b>2. Sodium-ion</b>	<b>17</b>
Informations de base	17
Composition chimique & principe de fonctionnement	17
Réactions électrochimiques simplifiées (décharge)	18
Performances typiques	18
Défis techniques	18
Progrès récents	18
Applications industrielles	18
<b>3. Redox-flow (Vanadium, organique)</b>	<b>19</b>
Informations de base	19
Composition chimique & principe de fonctionnement	19
Réactions électrochimiques simplifiées (VRFB)	19
Performances typiques	19
Défis techniques	20
Progrès récents	20
Applications industrielles	20
<b>4. Aluminium-ion</b>	<b>20</b>
Informations de base	20
Composition chimique & principe de fonctionnement	20
Réactions électrochimiques simplifiées (type Al-graphite)	21

Performances typiques	21
Défis techniques	21
Progrès récents	21
Applications industrielles	21
<b>5. Zinc-ion et Zinc-air</b>	<b>21</b>
Composition chimique & principe de fonctionnement	22
Réactions électrochimiques simplifiées	22
Performances typiques	22
Défis techniques	22
Progrès récents	22
Applications industrielles	23
<b>6. Magnésium-ion</b>	<b>23</b>
Informations de base	23
Composition chimique & principe de fonctionnement	23
Réactions électrochimiques simplifiées	23
Performances typiques (en laboratoire)	23
Défis techniques	24
Progrès récents	24
Applications industrielles (À terme)	24
<b>7. Dual-ion batteries</b>	<b>24</b>
Informations de base	24
Composition chimique & principe de fonctionnement	24
Réactions électrochimiques simplifiées	25
Performances typiques (en laboratoire)	25
Défis techniques	25
Progrès récents	25
Applications industrielles (futures)	26
<b>PARTIE III – Technologies futures ou expérimentales</b>	<b>29</b>
<b>1. Lithium-air</b>	<b>29</b>
Informations de base	29
Composition chimique & principe de fonctionnement	29
Réactions électrochimiques simplifiées (décharge)	29
Performances typiques (Prototypes)	29
Défis techniques	29
Progrès récents	30
Applications industrielles (horizon 2035+)	30
<b>2. Semi-solides haute densité</b>	<b>30</b>
Informations de base	30
Composition chimique & principe de fonctionnement	30
Réactions électrochimiques simplifiées	30
Performances typiques (prototypes et pré-séries)	31
Défis techniques	31
Progrès récents	31
Applications industrielles	31
<b>3. solides</b>	<b>31</b>
Informations de base	31
Composition chimique & principe de fonctionnement	32
Réactions électrochimiques (génériques)	32
Performances typiques (prototypes avancés)	32

Défis techniques	32
Progrès récents	32
Applications industrielles (2026–2030)	33
Focus – TOROW (France)	33
<b>4. Batteries quantiques (Quantum-dot-based)</b>	<b>33</b>
Informations de base	33
Composition chimique & principe de fonctionnement	33
Mécanismes anticipés (expérimentaux)	33
Performances visées (projections)	34
Défis techniques	34
Progrès récents	34
Applications industrielles (2035+ si concrétisé)	34
<b>5. Batteries 3D imprimées</b>	<b>34</b>
Informations de base	34
Composition chimique & principe de fonctionnement	35
Fonctionnement	35
Performances typiques (microbatteries)	35
Défis techniques	35
Applications industrielles	35
<b>6. Batteries auto-réparantes</b>	<b>35</b>
Informations de base	36
Composition chimique & principe de fonctionnement	36
Réactions électrochimiques	36
Performances typiques (Laboratoire)	36
Défis techniques	36
Applications industrielles (long terme)	36
<b>7. Supercondensateurs hybrides</b>	<b>36</b>
Informations de base	37
Composition chimique & principe de fonctionnement	37
Réactions (simplifiées)	37
Performances typiques	37
Défis techniques	37
Applications industrielles	37
<b>Tableau comparatif des technologies de batteries</b>	<b>38</b>
<b>PARTIE IV – Approche stratégique et prospective</b>	<b>39</b>
1. Cartographie des applications par technologie	39
2. Enjeux géopolitiques et industriels	39
Ressources critiques : extraction, dépendance, géopolitique	39
Polarisation industrielle	40
Nouveaux enjeux stratégiques (2025-2035-	40
3. Synthèse comparative globale	41
4. Conclusion	41
<b>PARTIE V – FAQ : RÉPONSES AUX QUESTIONS FRÉQUENTES ET OBJECTIONS COURANTES (après discussions sur LinkedIn)</b>	<b>42</b>

<i>1. Les batteries Li-metal ne posaient-elles pas des problèmes de sécurité (dendrites, courts-circuits) ?</i>	42
<i>2. Le recyclage sera-t-il encore possible avec autant de technologies différentes ?</i>	42
<i>3. Les gigafactories françaises seront-elles compatibles avec les nouvelles technologies ?</i>	42
<i>4. Les annonces d'augmentation d'autonomie sont-elles crédibles ?</i>	42
<i>5. La transition énergétique ne repose-t-elle pas elle-même sur des ressources fossiles ?</i>	43
<i>6. Les biocarburants ne seraient-ils pas une alternative plus simple que les batteries ?</i>	43
<i>7. L'objectif est-il vraiment d'augmenter l'autonomie ou plutôt de réduire le poids ?</i>	43
<i>8. Et la réparabilité des batteries ? Peut-on les réparer ou seulement les recycler ?</i>	43
1. L'évolution des designs vers la modularité	44
2. Le reconditionnement comme prolongement de vie	44
3. Le cadre réglementaire pousse à l'écoconception	44
En résumé	44
<b>Sources documentaires et techniques</b>	<b>46</b>
1. Agences internationales & rapports institutionnels	46
2. Données industrielles et entreprises du secteur	46
3. Recherches scientifiques (revues & universités)	46
4. Bases de données sectorielles & veille technologique	46
5. Veille géopolitique et réglementaire	47
Normes & protocoles logiciels / BMS	47
7. Sources secondaires & vulgarisation sérieuse	47

## PARTIE I : BATTERIES ACTUELLEMENT COMMERCIALISÉES

### 1. LITHIUM-ION NMC

#### INFORMATIONS DE BASE

La batterie NMC utilise une cathode à base de nickel, manganèse et cobalt (NMC 111, 622, 811) et une anode en graphite.

- ✓ Densité énergétique élevée (~250 Wh/kg)
- ✓ Bon équilibre performance / coût / sécurité
- ✗ Coût élevé (cobalt, nickel), risques thermiques

Utilisations : véhicules électriques généralistes, outils portatifs, appareils mobiles.

#### COMPOSITION CHIMIQUE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La technologie NMC repose sur une cathode composée d'un oxyde mixte de lithium, de nickel, de manganèse et de cobalt :

$\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$ , avec  $x + y + z = 1$ .

Les proportions varient selon les générations :

- ◇ NMC 111 → Ni:Mn:Co = 1:1:1 (équilibrée mais chère)
  - ◇ NMC 532 → 5:3:2 (compromis densité/coût)
  - ◇ NMC 622 → 6:2:2 (plus de Ni, moins de Co)
  - ◇ NMC 811 → 8:1:1 (densité maximale, faible stabilité)
- 👉 Plus la teneur en nickel augmente, plus la capacité spécifique croît (jusqu'à 210–220 mAh/g), mais au détriment de la stabilité thermique et cyclique.
- 👉 Le cobalt améliore la stabilité structurale, mais est coûteux et controversé (RDC, chaînes éthiques).

L'anode est typiquement en graphite naturel ou synthétique, avec parfois ajout de silicium (pour booster la capacité jusqu'à 370 mAh/g)

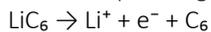
#### RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES

À la cathode (décharge) :



(M = Ni, Mn, Co)

À l'anode (décharge) :



Tension nominale : 3,6–3,7 V

Plage utile : 2,8 à 4,2 V selon le BMS

#### PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	180–250 Wh/kg (cellule)
Densité volumique	500–700 Wh/L

Capacité spécifique NMC	150–210 mAh/g
Durée de vie (cycles)	1000–2000 cycles (DoD 80 %)
Température nominale	10 à 45 °C (optimum 25 °C)
Taux d'autodécharge	~2–3 % par mois
Tension de sécurité max	4,2 V/cell

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Instabilité thermique à haute tension (>4,2 V) : formation de gaz, réactions exothermiques avec électrolyte.
- ◇ Dissolution des métaux de transition, surtout Mn, accélérant le vieillissement.
- ◇ Dendrites de lithium en cas de surcharge ou d'anode Si mal stabilisée.
- ◇ Dérive de tension avec le temps, affectant les BMS et la capacité utilisable.

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Revêtements de cathode ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) : améliorent la cyclabilité et réduisent la dégradation.
- ◇ Dopage de structure ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ) : améliore la stabilité des couches.
- ◇ Couches à gradient de composition (Ni central, Co/Mn périphérique) pour combiner densité et stabilité.
- ◇ Remplacement partiel du graphite par du  $\text{SiO}_x$  à l'anode pour atteindre >300 mAh/g.

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Véhicules électriques de milieu et haut de gamme : Renault Zoé (NMC622), Hyundai Kona, Kia e-Niro, Volkswagen ID.
- ◇ Power tools / E-bike premium
- ◇ Stationnaire haute densité (moins fréquent, remplacé par LFP ou sodium-ion à terme)

## 2. LITHIUM-ION LFP

### INFORMATIONS DE BASE

La cathode est composée de phosphate de fer lithié ( $\text{LiFePO}_4$ ), structure olivine très stable.

- ✓ Excellente sécurité thermique
- ✓ Longévité (>3000 cycles), coût bas, pas de cobalt
- ✗ Moins dense (~160–180 Wh/kg), sensible au froid

Utilisations : Tesla SR+, BYD, stockage stationnaire.

### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie LFP repose sur une cathode de phosphate de fer lithié, de formule  $\text{LiFePO}_4$ , structurée en réseau olivine orthorhombique.

Cette structure très stable confère à la batterie une excellente sécurité thermique et une longévité remarquable.

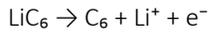
L'anode est classiquement en graphite, parfois modifiée avec du carbone amorphe pour compenser la plus faible densité énergétique de la cathode.

## RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES

À la cathode (décharge) :



À l'anode (décharge) :



Tension nominale : 3,2–3,3 V

Plage utile : 2,5 à 3,65 V (plage plus étroite que NMC)

## PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	120–170 Wh/kg (cellule)
Densité volumique	300–400 Wh/L
Capacité spécifique LFP	~160 mAh/g
Durée de vie (cycles)	2500–4000 cycles (DoD 80 %)
Température nominale	-10 à 55 °C
Autodécharge	~1–2 % / mois
Courant de décharge max	Jusqu'à 5–10C (config industrielle)

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Densité énergétique inférieure à celle des NMC : autonomie plus faible à taille équivalente.
- ◇ Tension plus basse (3,2 V) → moins d'énergie transférée par cycle.
- ◇ Courbe de décharge plate, ce qui complique la mesure d'état de charge (SOC).
- ◇ Conductivité intrinsèque faible (solution : dopage au carbone, architecture 3D).

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Particules nanométriques dopées au carbone → réduction des distances de diffusion électronique.
- ◇ Assemblages en cellules prismatiques et LFP-BLADE (BYD) : meilleur compactage, résistance aux chocs.
- ◇ Optimisation des BMS pour des profils de décharge plats (ex: Tesla SR+).
- ◇ Densité volumique améliorée grâce à des électrodes plus épaisses à faible porosité.

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Véhicules électriques grand public : Tesla Model 3 SR+, Dacia Spring, BYD Dolphin/Atto 3.
- ◇ Véhicules utilitaires / taxis (forte cyclabilité requise)
- ◇ Stockage stationnaire : solutions solaires, batteries domestiques (Powerwall LFP)
- ◇ Mobilité légère : scooters, e-bikes, logistique urbaine

## FOCUS – BATTERIE BLADE (BYD)

La batterie Blade, développée par BYD, est une déclinaison innovante de la technologie LFP (Lithium-Fer-Phosphate), conçue pour maximiser la sécurité, la compacité et la stabilité thermique.

- ◆ Structure allongée en “lames” :  
Les cellules sont plus longues et plus minces, ce qui permet de les empiler directement dans le pack (structure “cell-to-pack”) sans modules intermédiaires.
- ◆ Densité volumétrique optimisée :  
Bien que la densité gravimétrique reste modeste (typique du LFP), l’agencement permet de rattraper une partie de l’écart avec les NMC en densité au litre.
- ◆ Sécurité exceptionnelle :  
La Blade résiste aux tests de perforation, d’écrasement et de surchauffe sans emballement thermique (test du clou).  
Elle est considérée comme l’une des batteries LFP les plus sûres au monde.
- ◆ Longévité élevée (~3000 cycles), et coûts contenus grâce à l’absence de cobalt et nickel.

#### DÉPLOIEMENT :

- ◇ Utilisée dans les BYD Han, Seal, Dolphin, Atto 3, mais aussi dans des modèles de Tesla en Chine (usine Shanghai), Toyota bZ3, Stellantis (Leapmotor) ou des utilitaires.
- ◇ Elle équipe déjà plusieurs centaines de milliers de VE.

#### Enjeux stratégiques :

- ◇ BYD a fait de la Blade une arme géopolitique industrielle : peu coûteuse, sûre, éprouvée, facilement industrialisable.
- ◇ Elle montre que l’innovation peut venir d’un design structurel intelligent, même sur une chimie réputée “mature”.

### 3. LITHIUM-ION LCO

#### INFORMATIONS DE BASE

LCO (LiCoO<sub>2</sub>) est une technologie haute densité volumique, utilisée en électronique portable.

✓ Très compact

✗ Risques thermiques élevés, faible durée de vie (~500–800 cycles), coût élevé

Utilisations : smartphones, tablettes, caméras.

Composition chimique & principe de fonctionnement

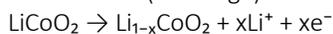
La technologie LCO repose sur une cathode composée d’oxyde de cobalt lithié, de formule LiCoO<sub>2</sub>, à structure lamellaire (hexagonale type α-NaFeO<sub>2</sub>).

Elle fut historiquement la première technologie lithium-ion commercialisée (Sony, 1991) et reste encore largement utilisée dans les appareils électroniques.

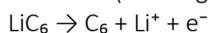
L’anode est généralement en graphite naturel, avec une architecture fine optimisée pour la compacité.

#### RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES

À la cathode (décharge) :



À l’anode (décharge) :



Tension nominale : 3,7 V

Plage utile : 3,0 à 4,2 V (au-delà, instabilité croissante)

## PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	180–250 Wh/kg (cellule)
Densité volumique	500–700 Wh/L
Capacité spécifique LCO	~140–150 mAh/g
Durée de vie (cycles)	500–1000 cycles (DoD 80 %)
Température nominale	0 à 40 °C
Tension max sécurisée	4,2 V/cell
Taux d'autodécharge	~5 % / mois

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Très faible stabilité thermique : risques d'emballement thermique dès 180–200 °C.
- ◇ Solubilité du cobalt dans l'électrolyte à haute tension : accélère le vieillissement.
- ◇ Structure fragile sous forte sollicitation (problèmes de délamination, fissuration).
- ◇ Tension élevée en fin de charge = stress électrochimique important.

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Revêtements protecteurs de surface ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{AlPO}_4$ ) pour stabiliser les interfaces.
- ◇ Alliages de cobalt ou dopages partiels (Mg, Al) pour réduire la solubilité.
- ◇ Intégration en cellules multicouches compactes, avec refroidissement passif.

Remarque : l'industrie tend à remplacer LCO par NMC ou LFP dès que la volumétrie ou la sécurité devient critique. LCO reste cependant inégalé en densité volumique, ce qui en fait une solution idéale pour les dispositifs ultra-compacts.

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Smartphones, tablettes, ordinateurs portables
- ◇ Caméras embarquées, drones civils, appareils photo
- ◇ Outils électroniques haut de gamme
- ◇ Certaines applications médicales portatives

## 4. LITHIUM-TITANATE (LTO)

### INFORMATIONS DE BASE

Anode en titanate de lithium ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), cathode NMC ou LFP.

- ✓ Recharge ultra-rapide (<10 min)
- ✓ Stabilité thermique, durée de vie >10 000 cycles
- ✗ Très faible densité (~80 Wh/kg), coût élevé

Utilisations : bus électriques, data centers, véhicules militaires.

## COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La technologie LTO repose sur une anode en titanate de lithium, de formule  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , qui remplace le graphite.

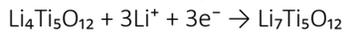
Cette structure spinel cubique est remarquable par sa stabilité dimensionnelle pendant les cycles, ce qui élimine presque entièrement les problèmes de dendrites.

La cathode peut être de type NMC, LFP ou parfois LMO (manganèse).

La tension d'électrode de l'anode est plus élevée (1,55 V vs  $\text{Li}/\text{Li}^+$ ), ce qui réduit la tension globale, mais évite la formation de lithium métal.

## RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES

À l'anode (décharge) :



(aucune expansion significative du volume cristallin)

À la cathode (ex : NMC) :



Tension nominale : 2,3–2,4 V

Plage utile : 1,8 à 2,8 V selon la cathode

## PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	70–90 Wh/kg (cellule)
Densité volumique	150–200 Wh/L
Capacité spécifique LTO	~175 mAh/g (anode)
Durée de vie (cycles)	>10 000 cycles (DoD 80–100 %)
Température nominale	-30 à +55 °C
Courant de charge max	Jusqu'à 10–15C
Taux d'autodécharge	<1 % / mois

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Faible densité énergétique : 2 à 3 fois inférieure à une batterie NMC.
- ◇ Tension globale réduite (~2,4 V) → plus de cellules pour une même puissance.
- ◇ Coût élevé lié à l'élaboration du titanate de lithium (synthèse, frittage).

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Couches d'anode LTO dopées au graphène pour améliorer la conductivité électronique.
- ◇ Assemblage en supercondensateur hybride pour usage ultra-rapide (véhicules stop-and-go).
- ◇ Développement de composites LTO/ $\text{Nb}_2\text{O}_5$  pour augmenter légèrement la tension tout en gardant la robustesse.

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Bus électriques à recharge rapide (arrêts fréquents : 5–10 min)
- ◇ Véhicules militaires / miniers (grande tolérance thermique)
- ◇ Data centers, secours hospitaliers, applications ferroviaires
- ◇ Batteries embarquées pour cycles ultra-intensifs (logistique, manutention)

Note : le LTO est souvent choisi non pas pour sa densité, mais pour sa robustesse, sa vitesse de charge/décharge et sa durée de vie extrême.

## 5. PLOMB-ACIDE (AGM, GEL)

### INFORMATIONS DE BASE

Batterie électrochimique au plomb avec électrolyte liquide, AGM ou gel.

- ✓ Technologie mature, recyclable (>95 %)
- ✓ Coût très bas
- ✗ Densité faible (30–50 Wh/kg), lourde, cycles limités

Utilisations : démarrage véhicule thermique, secours électrique.

### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie plomb-acide est fondée sur une réaction électrochimique réversible entre plomb (Pb), dioxyde de plomb (PbO<sub>2</sub>) et acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Elle repose sur deux électrodes immergées ou imprégnées d'électrolyte :

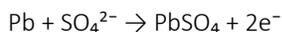
- ◇ Anode : plomb métallique (Pb)
- ◇ Cathode : dioxyde de plomb (PbO<sub>2</sub>)
- ◇ Électrolyte : acide sulfurique dilué (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Deux variantes modernes :

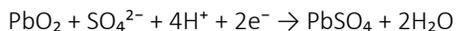
- ◇ AGM (Absorbent Glass Mat) : électrolyte absorbé dans des fibres de verre
- ◇ Gel : électrolyte gélifié (silice)

### RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES (DÉCHARGE)

Anode :



Cathode :



Tension nominale : 2,0 V par cellule

Assemblage typique : 6 cellules = 12 V

### PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	30–50 Wh/kg
Densité volumique	~80–100 Wh/L

Rendement énergétique	75–85 % (dépend du format)
Durée de vie (cycles)	300–800 cycles (DoD 50 %)
Température nominale	0 à 40 °C
Autodécharge	~4–5 % / mois
Courant de décharge max	Très élevé sur courte durée

## DÉFIS TECHNIQUES

- Faible densité énergétique (3 à 5 fois inférieure au Li-ion)
- Durée de vie limitée surtout en décharges profondes (DoD > 50 %)
- Formation de sulfates (sulfatation) irréversible en cas de stockage prolongé déchargé
- Sensibilité aux températures extrêmes (gel = dégradation électrolyte)

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Plomb-carbone (Pb-C) : meilleure cyclabilité, réduit la sulfatation
- ◇ Optimisation des plaques (alliages Pb–Ca, structure poreuse) pour améliorer les échanges ioniques
- ◇ Systèmes VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) : sans entretien, à recombinaison de gaz
- ◇ Recyclage optimisé : taux de récupération > 95 %, filière industrialisée

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Batteries de démarrage dans véhicules thermiques (SLA 12 V)
- ◇ Systèmes d'alimentation de secours (hôpitaux, télécoms)
- ◇ Chariots élévateurs, nacelles, systèmes de levage
- ◇ UPS (onduleurs), centrales photovoltaïques isolées

**Remarque :** le plomb-acide reste la technologie de stockage la plus produite en volume dans le monde, en raison de son coût très faible, de sa robustesse et de la simplicité de maintenance. Elle est cependant dépassée pour la plupart des usages mobiles et VE.

## 6. NICKEL-MÉTAL HYDRIDE (NIMH)

### INFORMATIONS DE BASE

Technologie basée sur absorption d'hydrogène dans un alliage métallique.

✓ Bonne sécurité, tolérance thermique

✗ Effet mémoire, faible densité (~60–120 Wh/kg)

Utilisations : hybrides non rechargeables (Toyota Prius), équipements industriels.

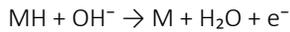
### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie NiMH repose sur une réaction entre une cathode en oxyhydroxyde de nickel (NiOOH) et une anode composée d'un alliage métallique capable d'absorber l'hydrogène (métal hydruré, souvent AB<sub>3</sub> ou AB<sub>2</sub> : lanthane-nickel, titane-zirconium-nickel).

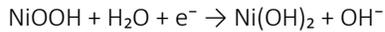
Elle utilise un électrolyte aqueux alcalin (solution de KOH) non inflammable, ce qui en fait une technologie très stable.

## RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES (DÉCHARGE)

Anode :



Cathode :



Tension nominale : 1,2 V par cellule

Assemblage typique : 6, 7 ou 8 cellules en série pour 7,2 à 9,6 V

## PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	60–120 Wh/kg
Densité volumique	150–300 Wh/L
Capacité spécifique	~1000–3000 mAh (selon format AA, D...)
Durée de vie (cycles)	800–1500 cycles (DoD < 80 %)
Température nominale	-10 à 50 °C
Autodécharge	10–30 % par mois (réduit sur LSD)
Rendement énergétique	~65–75 %

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Effet mémoire : perte de capacité si rechargée toujours partiellement (atténué sur versions récentes)
- ◇ Autodécharge élevée, notamment à température ambiante
- ◇ Rendement inférieur au Li-ion
- ◇ Chauffe importante à fort courant : gestion thermique nécessaire

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Version LSD (Low Self Discharge) : batteries prêtes à l'emploi (ex. Eneloop), perte <10 %/mois
- ◇ Amélioration des alliages hydrures ( $\text{AB}_5 \rightarrow \text{AB}_2$ , avec lanthane, titane) : meilleure capacité et cyclabilité
- ◇ Conception hermétique à recombinaison gazeuse (pas d'entretien)

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Véhicules hybrides non rechargeables (HEV) : Toyota Prius, Honda Insight
- ◇ Équipements médicaux ou de secours
- ◇ Électronique grand public réutilisable (piles AA/AAA rechargeables)
- ◇ Outils électriques professionnels (avant la généralisation du Li-ion)

Remarque : bien que progressivement supplantée par le lithium-ion, la technologie NiMH reste très fiable, sûre et robuste, avec une production encore soutenue dans l'automobile hybride.

**TABLEAU COMPARATIF – BATTERIES ACTUELLEMENT UTILISÉES**

Technologie	Densité (Wh/kg)	Cycles	Sécurité	Coût	Applications
NMC	220–270	1000+	Moyenne	💰💰💰	VE généralistes
LFP	150–180	3000+	Excellente	💰	VE entrée de gamme / ESS
LCO	~250 (vol.)	500–800	Faible	💰💰💰	Smartphones / caméras
LTO	~80	10 000+	Excellente	💰💰	Bus / secours / militaires
Plomb-acide	30–50	500–800	Moyenne	💰	Démarrage / backup
NiMH	60–120	1000–1500	Bonne	💰	Hybrides Toyota

## PARTIE II – TECHNOLOGIES AVANCEES ET EN COURS DE DEPLOIEMENT

### 1. LITHIUM-SOUFRE

#### INFORMATIONS DE BASE

Cathode à base de soufre élémentaire, anode en lithium métal. Réaction redox soufre/lithium.

✓ Densité théorique très élevée (>500 Wh/kg)

✓ Masse réduite, coût faible (soufre abondant)

✗ Faible durée de vie (dissolution du soufre), cyclage instable, besoin de confinement

Applications : drones, aéronautique, applications militaires, potentiel VE à long terme.

#### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie Li-S repose sur l'utilisation de soufre élémentaire ( $S_8$ ) comme cathode et de lithium métal comme anode.

Le fonctionnement repose sur une série de réactions redox formant successivement des polysulfures de lithium solubles ( $Li_2S_n$ ,  $n = 2-8$ ) puis insolubles ( $Li_2S_2$ ,  $Li_2S$ ), qui précipitent en fin de cycle.

Le soufre est un matériau :

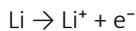
◇ Abondant, léger, peu coûteux,

◇ Ayant une capacité théorique élevée : 1672 mAh/g (contre 160–220 mAh/g pour NMC ou LFP).

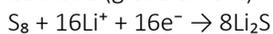
👉 Capacité théorique totale : ~2600 Wh/kg pour la cellule active (non atteint en pratique).

#### RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES (DÉCHARGE)

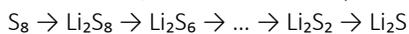
Anode :



Cathode (globalement) :



✍ En réalité, la réaction se fait par étapes successives :



Chaque intermédiaire ayant des propriétés de solubilité et de diffusion différentes.

Tension nominale : ~2,1 V

Plage utile : 1,8 à 2,6 V

#### PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	300–500 Wh/kg (prototypes)
Densité volumique	~300–400 Wh/L
Capacité spécifique (soufre)	1000–1200 mAh/g (en usage)
Durée de vie (cycles)	100–500 cycles (encore limité)

Température nominale	10 à 40 °C
Taux d'autodécharge	Faible (si confinement efficace)
Densité gravimétrique	300–500 Wh/kg (prototypes)

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Effet navette des polysulfures : les formes intermédiaires solubles migrent vers l'anode, causant des pertes d'électrolyte et une auto-décharge → baisse de capacité rapide.
- ◇ Faible conductivité intrinsèque du soufre et de  $\text{Li}_2\text{S}$  : nécessite des matrices conductrices (carbone, graphène).
- ◇ Dilatation volumique importante (>70 %) de la cathode → stress mécanique.
- ◇ Lithium métal = instabilité : dendrites, court-circuits potentiels.

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Hôtes carbonés nanostructurés (tubes, mousses, graphène) → confinement des polysulfures.
- ◇ Électrolytes semi-solides / localisés pour limiter l'effet navette.
- ◇ Anodes protégées par céramiques minces ou couches interfaciales ( $\text{Li}_3\text{N}$ , LPSCI).
- ◇ Intégration de liants auto-réparants pour absorber les tensions de cycle.

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Aéronautique / spatial : ratio énergie/masse inégalé
- ◇ Drones longue autonomie
- ◇ Défense / usage militaire (capacité + poids critique)
- ◇ Futur VE haut de gamme : après 2026–2028 si cyclabilité maîtrisée

Remarque : la batterie Li-S est une des rares à promettre un doublement de la densité énergétique par rapport aux batteries Li-ion classiques, tout en utilisant des matériaux abondants. Elle reste cependant instable et délicate à produire à grande échelle.

## 2. SODIUM-ION

### INFORMATIONS DE BASE

Substitut au lithium, utilisant le sodium ( $\text{Na}^+$ ). Électrolyte proche, cathodes NFM ou Prussian White.

✓ Coût très bas, sodium très abondant

✓ Bonne stabilité thermique

✗ Densité plus faible (~120–160 Wh/kg), développement encore jeune

Applications : stockage stationnaire, petits véhicules, marché de volume (Inde, Asie).

### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie sodium-ion fonctionne sur le même principe que la lithium-ion, mais utilise des ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) au lieu de lithium.

Le sodium, plus abondant et moins coûteux que le lithium, permet de réduire la dépendance aux métaux critiques (pas de cobalt ou de nickel dans la plupart des formulations).

👉 Le rayon ionique de  $\text{Na}^+$  (1,02 Å) est plus grand que celui de  $\text{Li}^+$  (0,76 Å), ce qui pose des défis structuraux et limite la densité énergétique.

**CATHODES TYPIQUES :**

- ◇ NFM : oxydes de sodium-fer-manganèse ( $\text{Na}_x\text{Fe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_2$ )
- ◇  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ ,  $\text{NaCoO}_2$ , ou variantes de type Prussian white ( $\text{Na}_2\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ )

**ANODES TYPIQUES :**

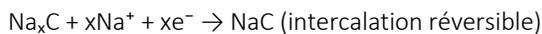
- ◇ Carbone dur amorphe (hard carbon) → structure poreuse adaptée à la taille de  $\text{Na}^+$
- ◇ Oxyde de titane, alliages Sn, ou matériaux organiques (en labo)

**REACTIONS ELECTROCHIMIQUES SIMPLIFIEES (DECHARGE)**

Cathode :



Anode :



Tension nominale : 2,3 à 3,3 V

Plage utile : dépend de la chimie exacte, typiquement 2,0 à 3,8 V

**PERFORMANCES TYPIQUES**

Critère	Valeur indicative
densité gravimétrique	100–160 Wh/kg (cellule)
Densité volumique	~200–300 Wh/L
Capacité spécifique	80–150 mAh/g (selon cathode)
Durée de vie (cycles)	1000–3000 cycles
Température nominale	-20 à 60 °C
Coût matière/kg	~30–40 % inférieur au Li-ion
densité gravimétrique	100–160 Wh/kg (cellule)

**DEFIS TECHNIQUES**

- ◇ Rayon ionique du  $\text{Na}^+$  : plus gros → mobilité plus faible, contraintes mécaniques accrues.
- ◇ Moins de diversité de matériaux d'anodes compatibles.
- ◇ Moins bonne densité énergétique que le Li-ion (~30 % en moins).
- ◇ Pas encore de standard industriel mondial (formats, tension, BMS).

**PROGRES RECENTS**

- ◇ Cathodes NFM avancées avec cyclabilité >3000 cycles à 80 % DoD.
- ◇ Développement de carbone dur microstructuré pour meilleure réversibilité.
- ◇ Premières cellules commerciales (CATL, HiNa, Natron) avec 160–170 Wh/kg.
- ◇ Systèmes BMS adaptés à des profils de tension différents.

**APPLICATIONS INDUSTRIELLES**

- ◇ Stockage stationnaire solaire/éolien (où le poids compte peu)
- ◇ Véhicules légers / urbains / deux-roues

- ◇ Marchés à forte contrainte de coût (Inde, Sud-Est asiatique)
- ◇ Transition stratégique hors lithium (Europe, Chine)

Remarque : le sodium-ion pourrait remplacer le lithium-fer-phosphate (LFP) dans certains usages économiques dès 2025–2026, avec un potentiel important en ESS et en véhicules légers.

### 3. REDOX-FLOW (VANADIUM, ORGANIQUE)

#### INFORMATIONS DE BASE

Système liquide à électrolytes circulants, séparation des fonctions de puissance et d'énergie.

- ✓ Cyclabilité quasi infinie, sécurité, stockage de longue durée
  - ✓ Modulable à très grande échelle
  - ✗ Très volumineux, faible densité, faible rendement
- Applications : stockage réseau, solaire/éolien stationnaire.

#### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries redox-flow se distinguent fondamentalement des batteries classiques : L'énergie est stockée dans des électrolytes liquides contenant des couples redox dissous, circulant entre deux réservoirs externes via une cellule électrochimique séparée par une membrane.

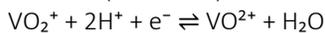
La puissance est déterminée par la surface de la cellule, la capacité par le volume des électrolytes.

#### TYPES DE COUPLES REDOX :

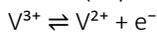
- ◇ Vanadium–Vanadium (VRFB) : solution acide contenant différents états de vanadium ( $V^{2+}/V^{3+}$  et  $VO^{2+}/VO_2^+$ )
- ◇ Zinc–Bromine (Zn–Br), Fer–Chromium, ou couples organiques (benzoquinone, alloxazine)

#### RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES (VRFB)

Cathode (réduction) :



Anode (oxydation) :



Tension nominale : ~1,26 V

Plage utile : ~0,8–1,6 V selon formulation

#### PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	20–50 Wh/kg (système complet)
Densité volumique	30–80 Wh/L
Durée de vie (cycles)	>10 000 cycles / 15–20 ans
Rendement énergétique	70–80 %
Autodécharge	Négligeable (pas de migration inter-électrolyte)

Température nominale	0 à 40 °C
----------------------	-----------

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Très faible densité énergétique : inadéquat pour les applications embarquées
- ◇ Complexité d'installation : pompes, capteurs, systèmes de contrôle
- ◇ Coût élevé du vanadium et dépendance à ses fluctuations
- ◇ Équilibrage des électrolytes nécessaire pour éviter le décalage de capacité entre les deux réservoirs

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Formulations organiques non toxiques à base de quinones : coût réduit, faible toxicité
- ◇ Optimisation des membranes échangeuses d'ions : réduction des pertes par croisement
- ◇ Développement de VRFB haute température et de nouveaux mélanges bipolaires
- ◇ Prototypes modulaires conteneurisés pour le réseau

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Stockage stationnaire réseau / microgrids (jusqu'à 100 MWh)
- ◇ Stabilisation des renouvelables (PV, éolien)
- ◇ Sites isolés, data centers, industriels off-grid
- ◇ Applications militaires ou critiques (sécurité, endurance)

**Remarque :** les redox-flow sont les champions de la cyclabilité (>10 000 cycles sans dégradation notable) et du stockage longue durée (>12 h). Ils s'imposent dans les logiques de stabilité réseau et souveraineté énergétique, mais restent inutilisables dans la mobilité.

## 4. ALUMINIUM-ION

### INFORMATIONS DE BASE

Utilise une anode en aluminium métal, cathode en carbone ou oxyde.

- ✓ Capacité volumique théorique élevée
  - ✓ Vitesse de recharge très rapide
  - ✗ Problèmes de cyclage, électrolyte complexe (ion chlorure), faible TRL
- Applications : recherche active, potentiel militaire/industriel.

### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie aluminium-ion exploite les propriétés trivalentes de l'aluminium ( $Al^{3+}$ ) pour stocker plus d'électrons par ion que le lithium ( $Li^+$ ) ou le sodium ( $Na^+$ ), ce qui augmente théoriquement la capacité spécifique.

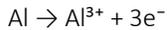
Elle repose en général sur :

- ◇ Anode : aluminium métallique (Al)
- ◇ Cathode : carbone graphitique (très poreux), oxydes métalliques, ou polymères conducteurs
- ◇ Électrolyte : liquide ionique à base de chloroaluminate (ex. EMIm[AlCl<sub>4</sub>])

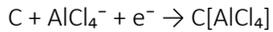
👉 Le système repose sur des réactions de complexation et d'intercalation d'ions  $AlCl_4^-$  ou  $Al_2Cl_7^-$ , très différentes des transferts d'ions métalliques classiques.

## REACTIONS ELECTROCHIMIQUES SIMPLIFIEES (TYPE AL–GRAPHITE)

Anode (oxydation) :



Cathode (réduction / intercalation) :



Tension nominale : 1,7 à 2,2 V

Plage utile : dépend du système, max ~2,4 V

## PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	70–150 Wh/kg (cellule)
Densité volumique	~150–250 Wh/L
Capacité spécifique (Al)	~3000 mAh/g (anode, théorique)
Durée de vie (cycles)	1000–7000 cycles (selon cathode)
Température nominale	10 à 60 °C
Conductivité ionique	Très élevée dans électrolyte

## DEFIS TECHNIQUES

- ◇ Incompatibilité avec électrolytes aqueux ou standard Li-ion → besoin de liquides ioniques complexes (toxiques, chers, corrosifs)
- ◇ Formation de sous-produits complexes ( $\text{Al}_2\text{Cl}_7^{-}$ ) perturbant l'équilibre redox
- ◇ Matériaux de cathode encore expérimentaux (tenue mécanique, intercalation réversible)
- ◇ Reproductibilité industrielle faible à ce jour

## PROGRES RECENTS

- ◇ Cathodes en graphène 3D microporeux : grande surface d'intercalation → meilleures performances
- ◇ Électrolytes ioniques à faible viscosité et meilleure stabilité thermique
- ◇ Recherches sur des cathodes polymères à conductivité électronique intrinsèque
- ◇ Tests de cellules aluminium-soufre (Al–S) avec densité >250 Wh/kg (encore instables)

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Stationnaire urbain / basse tension / cyclage rapide
- ◇ Électronique portable / capteurs autonomes
- ◇ Mobilité urbaine ultra-légère (vélo, trottinette)
- ◇ Potentiel militaire ou spatial long terme

**Remarque :** bien que prometteuses, les batteries aluminium-ion sont encore en phase pré-industrielle. Leur principal atout est la valeur de l'aluminium : abondant, peu cher, recyclable, avec un potentiel pour l'après-lithium dans des usages spécifiques.

## 5. ZINC-ION ET ZINC-AIR

Systèmes aqueux à base de zinc (anode), avec cathodes à air ou oxyde.

- ✓ Sécurité élevée, coût bas, recyclable
- ✓ Tolérance aux températures extrêmes
- ✗ Densité modeste (~80–130 Wh/kg), électrolyte corrosif

Applications : véhicules légers, secours, régions isolées.

## COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries à base de zinc utilisent le zinc métallique (Zn) comme anode, un électrolyte aqueux (souvent KOH ou ZnSO<sub>4</sub>), et différentes cathodes selon le système :

- ◇ Zinc-ion : cathode intercalante (oxyde de manganèse, vanadium, etc.)
- ◇ Zinc-air : cathode à réduction de l'oxygène de l'air (ORR) → système semi-ouvert, inspiré des piles à combustible

👉 Le zinc est un métal abondant, bon marché, non toxique, avec un potentiel redox modéré (-0,76 V vs SHE), ce qui en fait une alternative sûre aux métaux alcalins.

## REACTIONS ELECTROCHIMIQUES SIMPLIFIEES

Zinc-ion :

Anode :  $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

Cathode :  $\text{M}^{n+} + \text{e}^- \rightarrow \text{M}^{n-1+}$  (intercalation réversible)

Zinc-air (décharge) :

Anode :  $\text{Zn} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$

Cathode :  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

Tension nominale :

- Zinc-ion : ~1,2 à 1,6 V
- Zinc-air : ~1,65 V (théorique)

## PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Zinc-Ion	Zinc-Air
densité gravimétrique	100–150 Wh/kg	250–350 Wh/kg (primaire)
Densité volumique	~250–350 Wh/L	~500 Wh/L (théorique)
Durée de vie (cycles)	500–1000 cycles	1 (primaire) à 100+ (rechargeables instables)
Autodécharge	Très faible	Faible si bien confinée
Température nominale	-10 à 45 °C	0 à 35 °C

## DEFIS TECHNIQUES

- ◇ Formation de dendrites de Zn à la recharge → risque de court-circuit (zinc-ion)
- ◇ Réversibilité faible de la cathode à air (zinc-air) → limitation des cycles
- ◇ Électrolyte corrosif (KOH) → dégradation électrodes, complexité de confinement
- ◇ Effets de dessiccation et d'oxydation de l'anode à l'air libre (zinc-air)

## PROGRES RECENTS

- ◇ Cathodes à base de  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  nanostructurées pour zinc-ion → meilleure insertion réversible
- ◇ Membranes échangeuses de cations pour isoler la cathode d'oxygène
- ◇ Développement de zinc-air rechargeables bifonctionnelles (catalyseurs biface OER/ORR)
- ◇ Systèmes ZIB (Zinc-Ion Batteries) aqueux semi-solides avec grande stabilité (>1000 cycles)

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Stockage stationnaire décentralisé (zinc-ion en conteneurs)
- ◇ Électronique médicale (zinc-air, aides auditives, pacemakers)
- ◇ Secteurs isolés (zinc-air jetables longue autonomie)
- ◇ Véhicules utilitaires / industries off-grid (à condition de stabilité)

**Remarque :** bien qu'encore peu présents dans les véhicules électriques, les systèmes au zinc offrent une sécurité thermique maximale, une recyclabilité élevée et un bon potentiel de démocratisation à l'avenir, notamment en Afrique ou en Asie du Sud.

## 6. MAGNÉSIUM-ION

### INFORMATIONS DE BASE

Anode magnésium métal, avec électrolyte non aqueux spécifique.

- ✓ Capacité volumique élevée, très bon ratio coût/sécurité
- ✓ Pas de dendrites
- ✗ Électrolytes complexes, cinétique lente, cathodes à développer

Applications : en développement pré-industriel.

### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie magnésium-ion repose sur l'utilisation du magnésium métallique (Mg) comme anode, avec des électrolytes adaptés et des cathodes capables d'intercaler des ions  $\text{Mg}^{2+}$ .

Le magnésium a deux avantages clés :

- ◇ Il transporte 2 électrons par ion → densité énergétique volumique élevée
- ◇ Il ne forme pas de dendrites, même en dépôt direct

👉 Contrairement aux ions monovalents ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), les ions  $\text{Mg}^{2+}$  ont un comportement électrochimique plus complexe : leur mobilité est plus faible et les électrolytes classiques ne sont pas compatibles.

### REACTIONS ELECTROCHIMIQUES SIMPLIFIEES

Anode :



Cathode (ex :  $\text{Mo}_6\text{S}_8$  chevrel phase) :



Tension nominale : 1,0–2,5 V (selon la chimie)

Plage utile : dépend fortement de l'électrolyte

### PERFORMANCES TYPIQUES (EN LABORATOIRE)

Critère	Valeur indicative (prototypes)
Densité gravimétrique	100–250 Wh/kg (théorique : >400)
Densité volumique	300–600 Wh/L
Capacité spécifique (Mg)	2200 mAh/g (théorique)
Durée de vie (cycles)	200–1000 cycles (encore limité)
Température nominale	10 à 45 °C
Dendrites	Aucune formation observée

## DEFIS TECHNIQUES

- ◇ Peu d'électrolytes compatibles avec le magnésium métallique (réactions parasites avec solvant)
- ◇ Mobilité ionique faible :  $Mg^{2+}$  interagit fortement avec son environnement → diffusion lente
- ◇ Peu de cathodes réversibles : intercalation du  $Mg^{2+}$  difficile sans dégradation
- ◇ Faible tension de cellule comparée au Li-ion

## PROGRES RECENTS

- ◇ Développement d'électrolytes non aqueux complexes à base de TFSI,  $ClO_4^-$  ou borates fluorés
- ◇ Structure Chevrel ( $Mo_6S_8$ ) : seule cathode commercialement viable à ce jour
- ◇ Recherches sur des matériaux hybrides organiques (polyimides) pour accueillir  $Mg^{2+}$
- ◇ Études sur alliages Mg–Li ou Mg–Si pour faciliter la réversibilité

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES (À TERME)

- ◇ Stockage stationnaire longue durée et sécurisée
- ◇ Industrie ou défense (environnement explosif, haute fiabilité)
- ◇ Marchés émergents avec contraintes de coût et de sécurité
- ◇ Remplaçant potentiel du Li-ion si défis électrochimiques surmontés

Remarque : la batterie Mg-ion reste au stade pré-industriel, mais elle est considérée comme l'un des plus sérieux candidats à la succession du Li-ion dans des applications stationnaires et industrielles, grâce à sa sécurité et son densité volumique prometteuse.

## 7. DUAL-ION BATTERIES

### INFORMATIONS DE BASE

Ions positifs et négatifs participent aux échanges ( $Li^+$  et  $PF_6^-$  typiquement).

✓ Recharge rapide, grande stabilité à haute tension

✓ Haute efficacité énergétique

✗ Faible densité, peu de recul industriel

Applications : électronique, futur VE hybride

### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries dual-ion (DIB) se distinguent des Li-ion classiques en ce que les deux types d'ions – cations et anions – participent activement à la réaction électrochimique.

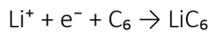
Au lieu de n'utiliser que  $\text{Li}^+$  en tant que porteur de charge, ces batteries exploitent aussi les anions ( $\text{PF}_6^-$ ,  $\text{TFSI}^-$ , etc.), ce qui permet de travailler à des tensions plus élevées et de réduire la masse active totale.

Structure typique :

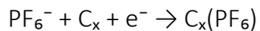
- ◇ Anode : graphite ou carbone dur (intercalation des cations  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , etc.)
- ◇ Cathode : graphite (intercalation des anions)
- ◇ Électrolyte : sel (ex.  $\text{LiPF}_6$ ) dans solvant organique à large fenêtre électrochimique

## REACTIONS ELECTROCHIMIQUES SIMPLIFIEES

Anode :



Cathode :



→ Il y a intercalation d'ions positifs (cations) dans l'anode et d'ions négatifs (anions) dans la cathode. Les deux électrodes sont donc actives en intercalation.

Tension nominale : 4,2 à 5,2 V

Plage utile : jusqu'à 5,5 V (selon l'électrolyte)

## PERFORMANCES TYPIQUES (EN LABORATOIRE)

Critère	Valeur indicative (prototypes)
Densité gravimétrique	100–180 Wh/kg
Densité volumique	250–400 Wh/L
Capacité spécifique	60–130 mAh/g
Durée de vie (cycles)	1000–3000 cycles
Température nominale	0 à 45 °C
Tension de fonctionnement	Très élevée (jusqu'à 5,2 V)
Densité gravimétrique	100–180 Wh/kg

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Électrolytes hautement stables requis pour tenir >5 V sans dégradation (peu nombreux)
- ◇ Oxydation des solvants fréquente → perte de capacité rapide
- ◇ Croissance de SEI (couche interfaciale solide) peu maîtrisée
- ◇ Intercalation anionique complexe et souvent peu réversible

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Développement de sels lithium fluorés ultra-stables
- ◇ Recherche sur des solvants fluorés à large fenêtre (>5 V)
- ◇ Utilisation de matériaux carbonés poreux optimisés pour les deux électrodes
- ◇ Expérimentations avec des DIB sodium-ion ( $\text{Na}^+$  /  $\text{ClO}_4^-$ ) pour réduire les coûts

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES (FUTURES)

- ◇ Électronique haute tension / faible encombrement
- ◇ Batteries secondaires pour dispositifs embarqués
- ◇ Secteurs critiques (aéronautique, spatial) avec besoin de tension élevée
- ◇ Hybridation avec supercondensateurs

Remarque : les batteries dual-ion ne sont pas encore prêtes pour le grand public, mais leur tension très élevée et leur capacité à utiliser des matériaux sans cobalt ni nickel en font un candidat crédible pour des niches haute performance.

## FOCUS — RECHARGE RAPIDE, COURBES DE CHARGE, LIMITES RÉELLES

Dans l’imaginaire collectif, l’important reste “l’autonomie totale”. Mais en réalité, c’est la vitesse de récupération de cette autonomie qui transforme l’usage.

Or, tous les VE ne se valent pas sur ce point. L’essentiel n’est pas la puissance pic (souvent mise en avant dans les brochures), mais la courbe de charge réelle :

→ combien de temps le véhicule reste au-dessus de 150 ou 200 kW ?

→ à quel SoC (état de charge) débute la chute de puissance ?

### L’OBJECTIF UTILISATEUR :

Recharger de 20 à 80 % en moins de 15 minutes, idéalement sur une batterie de 50 à 70 kWh.

👉 Pour cela, il faut maintenir une puissance moyenne > 150 kW, ce qui n’a rien d’évident.

### LES 4 PHASES D’UNE RECHARGE DC RAPIDE :

1. Montée en puissance
  - ◇ De 0 à ~15 % SoC : la puissance augmente progressivement
  - ◇ Limitée par la température batterie et la tension initiale
2. Plateau (20 à ~50–65 %)
  - ◇ La batterie accepte sa puissance nominale maximale (ex. 125–230 kW)
  - ◇ Ici, le refroidissement, la résistance interne et l’algorithme BMS sont cruciaux
3. Chute progressive (65–85 %)
  - ◇ Pour éviter les surtensions, le courant diminue
  - ◇ La tension se stabilise mais le courant chute → la puissance diminue fortement
4. Fin de charge lente (85–100 %)
  - ◇ Phase de saturation, très lente, souvent inutilisée en recharge rapide

### POURQUOI LA COURBE CHUTE VITE SUR CERTAINS MODÈLES (EX : MÉGANE EV60) ?

- ◇ Le refroidissement passif ou insuffisant limite l’absorption d’énergie au-delà de 50–55 %
- ◇ Le BMS est conservateur, pour préserver la durée de vie des cellules
- ◇ Les cellules elles-mêmes (NMC standard) chauffent vite et n’aiment pas les charges longues à haute intensité

👉 *Résultat : sur certains modèles, la “puissance nominale” affichée (ex : 130 kW) n’est atteinte que 3–4 minutes, puis chute à 70–90 kW.*

### POURQUOI HYUNDAI/KIA TIENNENT MIEUX ?

- ◇ Architecture 800V au lieu de 400V → moins d'échauffement pour un même niveau de puissance
- ◇ Refroidissement liquide performant, y compris du pack
- ◇ Cellules plus robustes (SK Innovation, parfois avec base NCM811)
- ◇ BMS optimisé pour plateau stable jusqu'à 70–75 % SoC

💡 Ex : Ioniq 5 peut tenir 225 kW jusqu'à 60 % sans chute brutale.

### ET DEMAIN ?

- ◇ Les batteries semi-solides ou solides (CATL, Toyota, ProLogium) devraient tenir >200 kW sur 50 % de la charge utile
- ◇ Les batteries à faible résistance (ex : LTO, sodium optimisé) permettront des plateaux très stables, mais à densité plus faible
- ◇ L'architecture cell-to-pack (Blade, CTP 3.0) améliore le refroidissement et la répartition thermique

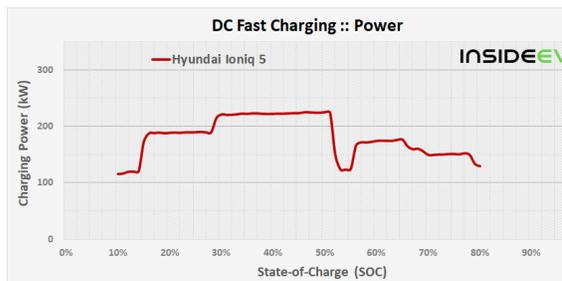
### EN RÉSUMÉ :

Facteur clé	Impact sur la recharge rapide
Résistance interne	Chauffe → réduit le courant autorisé
Température batterie	Déclenche des seuils de sécurité
Architecture tension	Moins de perte en 800V → plateau plus stable
BMS	Gère les transitions, équilibre, sécurité
Qualité du refroidissement	Allonge la durée du plateau

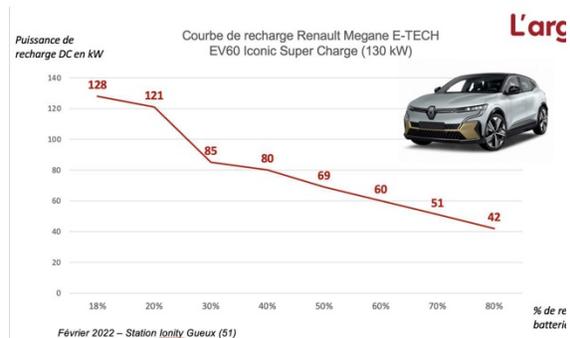
📌 Le défi n'est donc pas la puissance "max", mais la capacité à la tenir — sans tuer la batterie, sans dégrader la sécurité, et sans surdimensionner l'électronique.

C'est là que tout va se jouer entre constructeurs... et dans les choix stratégiques de demain.

### ILLUSTRATION : COMPARATIF DES COURBES DE CHARGES DC



Source : InsideEVs – Avril 2021



Source : L'Argus – Février 2022 (Ionity Gueux)

Voici quelques données techniques qui donnent un début d'explication :

Paramètre	Renault Mégane EV60 (130 kW DC)	Hyundai Ioniq 5 (233 kW DC)
Architecture électrique	400 V	800 V
Capacité batterie	60 kWh	77,4 kWh
Puissance maximale	130 kW	233 kW

<i>Temps 10–80 % (DC)</i>	~35 min	~18 min
<i>Plateau de charge stable</i>	20–55 % SoC	10–75 % SoC
<i>Chute de puissance</i>	Dès 55 % SoC	Après 75 % SoC
<i>Refroidissement batterie</i>	Liquide, limité	Liquide, optimisé
<i>Courbe de charge</i>	Pic court, chute rapide	Plateau long, chute progressive

## LECTURE COMPARATIVE (ANALYSE CROISÉE)

*RENAULT MÉGANE EV60 :*

Courbe décroissante avec un pic bref (128 kW) suivi d'une baisse marquée dès 30 % SoC. En dessous de 60 kW dès 60 %.

Recharge de 10 à 80 % (42 kWh) en ~35 min

Architecture 400 V classique, BMS prudent, refroidissement modéré : la batterie atteint bien 128 kW en pic, mais chute rapidement après 25–30 % de SoC.

Dès 55 %, la puissance tombe sous les 60 kW. Temps de recharge 10–80 % ≈ 35 minutes.

*HYUNDAI IONIQ 5 :*

Courbe en plateau maintenu entre 18 et 75 % SoC, à ~220–230 kW, grâce à l'architecture 800V et un système thermique optimisé.

Recharge 10–80 % (56 kWh) en ~18 min.

Architecture 800 V, cellules robustes, gestion thermique optimisée.

La puissance monte à ~230 kW et reste stable jusqu'à 75 % SoC.

Résultat : recharge 10–80 % en moins de 20 minutes, avec meilleure linéarité.

 *Ces exemples montrent que la vraie performance ne se mesure ni au pic de puissance, ni à la capacité batterie brute...*

*Mais à la régularité de la courbe de charge et à l'intelligence thermique/logicielle du système batterie.*

## PARTIE III – TECHNOLOGIES FUTURES OU EXPÉRIMENTALES

### 1. LITHIUM-AIR

#### INFORMATIONS DE BASE

Utilise l'oxygène atmosphérique comme cathode et du lithium métal comme anode.

✓ Densité théorique record (>1000 Wh/kg)

✓ Léger, sans cathode solide

✗ Instabilité des réactions avec O<sub>2</sub>, faible durée de vie, très faible rendement

Applications : longue autonomie (aéronautique, spatial), recherche universitaire.

#### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La batterie lithium-air utilise l'oxygène atmosphérique comme réactif cathodique, au lieu d'un matériau solide.

Elle repose sur l'oxydation du lithium métallique à l'anode et la réduction de l'oxygène à la cathode, formant du peroxyde ou superoxyde de lithium (Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ou LiO<sub>2</sub>) selon la chimie.

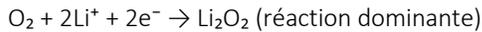
Le système est potentiellement le plus dense en énergie parmi toutes les batteries connues, avec une capacité théorique supérieure à 3500 Wh/kg (comparable à l'essence sur base massique).

#### RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES (DÉCHARGE)

Anode :



Cathode (en solution aqueuse ou organique) :



✔ Certaines variantes génèrent Li<sub>2</sub>O, LiO<sub>2</sub> ou même LiOH (en milieu aqueux).

Tension nominale : 2,7–3,2 V

Plage utile : 2,2 à 3,6 V (selon électrolyte)

#### PERFORMANCES TYPIQUES (PROTOTYPES)

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	>1000 Wh/kg (théorique)
Densité volumique	~800 Wh/L (objectif labo)
Durée de vie (cycles)	50–200 cycles (actuel)
Température nominale	10 à 35 °C
Réversibilité	Faible à moyenne

#### DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Réactions parasites avec l'électrolyte : formation de produits irréversibles, dégradation
- ◇ Blocage de la cathode par précipitation des oxydes (colmatage, perte de porosité)

- ◇ Recyclabilité très faible à ce jour : très difficile à recharger plus de 100 fois
- ◇ Stabilité très dépendante de l'humidité, du CO<sub>2</sub> et de la pureté de l'oxygène

### PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Cathodes poreuses en graphène / nanotubes pour favoriser l'oxygénation
- ◇ Électrolytes solides / gélifiés pour contenir les sous-produits
- ◇ Recherches sur les systèmes fermés (O<sub>2</sub> comprimé) pour usage spatial / militaire
- ◇ Couches catalytiques bifonctionnelles (Pt, Ru, MnO<sub>x</sub>) pour favoriser ORR et OER

### APPLICATIONS INDUSTRIELLES (HORIZON 2035+)

- ◇ Aéronautique / spatial : priorité au ratio énergie/masse
- ◇ Drones longue distance
- ◇ Équipements embarqués ultra-légers
- ◇ Véhicules électriques à très longue autonomie (encore lointain)

Remarque : bien qu'extrêmement prometteuse, la technologie Li-Air est encore loin d'être mature, notamment à cause de ses problèmes de cyclabilité, de stabilité et de maîtrise des interfaces gazeuses.

## 2. SEMI-SOLIDES HAUTE DENSITÉ

### INFORMATIONS DE BASE

Formes hybrides entre électrolytes liquides et solides (slurries très denses).

- ✓ Simplifie l'industrialisation par rapport au solide pur
  - ✓ Compatible avec lignes existantes
  - ✗ Densité inférieure à celle du solide pur, propriété mécanique à stabiliser
- Applications : VE moyen/haut de gamme dès 2025–2026 (ex : CATL).

### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries semi-solides combinent les avantages des batteries traditionnelles (à électrolyte liquide) et ceux des batteries solides.

Elles utilisent des slurries très concentrés ou des pâtes électroactives comme électrodes, avec un électrolyte gélifié, faiblement liquide ou imprégné dans un support polymère.

Leur structure repose sur :

- ◇ Anodes/cathodes épaisses à haute charge active (jusqu'à 70 %), souvent à base de NMC, LFP ou LMO
- ◇ Électrolytes semi-solides (gel polymère, composite ionique, ou matrice organique dopée)

Ces formulations permettent une densité énergétique supérieure à celle des batteries classiques, sans les complexités mécaniques des solides purs.

### RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES SIMPLIFIÉES

Identiques aux couples redox Li-ion conventionnels :

- ◇  $\text{LiMO}_2 \leftrightarrow \text{Li}_{1-x}\text{MO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^-$
- ◇  $\text{LiC}_6 \leftrightarrow \text{C}_6 + \text{Li}^+ + e^-$

Tension nominale : 3,2 à 4,2 V

Plage utile : selon le couple chimique retenu (NMC, LFP, etc.)

## PERFORMANCES TYPIQUES (PROTOTYPES ET PRÉ-SÉRIES)

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	250–350 Wh/kg (avec lithium-métal)
Densité volumique	500–700 Wh/L
Durée de vie (cycles)	800–1500 cycles
Température nominale	0 à 55 °C
Viscosité	Contrôlée pour extrusion ou dépôt

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Rhéologie difficile à maîtriser : slurries trop visqueux ou trop fluides → mauvais dépôt
- ◇ Non-uniformité des électrodes si fabrication mal calibrée
- ◇ Conductivité ionique moyenne → dépend fortement de l'architecture interne
- ◇ Interface solide-liquide encore imparfaite pour haute vitesse de cyclage

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Assemblage par extrusion directe ou imprimante 3D
- ◇ Compatibilité avec l'anode lithium-métal grâce à des électrolytes dopés
- ◇ Développement de liants auto-structurants et auto-nivelants
- ◇ Prototypes semi-solides par 24M (Toyota), CATL, LGES

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Véhicules électriques moyen/haut de gamme (Toyota, dès 2025–2026)
- ◇ Outils industriels / transports spécialisés
- ◇ Hybridation avec supercondensateurs pour recharge rapide
- ◇ Batteries stationnaires de nouvelle génération

Remarque : les batteries semi-solides représentent une étape de transition pragmatique vers le tout-solide. Elles permettent une densité accrue sans rupture industrielle majeure, tout en s'adaptant aux lignes de production existantes.

## 3. SOLIDES

### INFORMATIONS DE BASE

Electrolyte entièrement solide (céramique, polymère ou sulfure), parfois avec anode lithium-métal.

- ✓ Sécurité accrue, forte densité énergétique, pas de solvant inflammable
- ✓ Compatible avec lithium-métal ou Si : autonomie renforcée
- ✗ Interfaces instables, risque de fissuration, industrialisation complexe

Applications : VE premium dès 2026, drones, spatial, défense, stockage embarqué contraint

## COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries entièrement solides remplacent l'électrolyte liquide par un électrolyte totalement solide, qui peut être :

- ◇ Céramique oxydique (LLZO –  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ , perovskite, NASICON...)
- ◇ Sulfure cristallin (LGPS, LPSCI, argyrodite)
- ◇ Polymère solide (PEO, PAN, souvent dopé de sels  $\text{Li}^+$ )

L'anode est souvent du lithium métallique, mais peut aussi être du graphite ou des alliages à base de silicium. Ces batteries permettent un meilleur couplage densité/sécurité, en particulier grâce à l'absence de solvants organiques inflammables.

## RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES (GÉNÉRIQUES)

Les réactions redox restent comparables à celles du Li-ion classique.

La grande différence réside dans la conduction ionique à travers un solide (plutôt qu'un liquide) et la complexité des interfaces électrode/électrolyte.

Exemple :

- ◇ Cathode :  $\text{LiMO}_2 \leftrightarrow \text{Li}_{1-x}\text{MO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^-$
- ◇ Anode :  $\text{Li} \leftrightarrow \text{Li}^+ + e^-$

Tension nominale : 3,2 à 4,2 V

Plage utile : similaire à celle des batteries Li-ion conventionnelles

## PERFORMANCES TYPIQUES (PROTOTYPES AVANCÉS)

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	300–450 Wh/kg
Densité volumique	600–800 Wh/L
Durée de vie (cycles)	1000–3000 cycles
Température nominale	-10 à 60 °C
Tension max sécurisée	>4,2 V (grâce à électrolyte stable)
Risque de dendrites	Faible à modéré (dépend du solide)

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Interfaces rigides → microfissures, délaminages, instabilités de contact
- ◇ Dendrites à travers électrolytes mous ou mal densifiés
- ◇ Résistance ionique élevée à l'état solide → besoin de films ultra-fins
- ◇ Coût de fabrication élevé (atmosphères sèches, pressage à chaud, matériaux sensibles à l'humidité)

## PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Électrolytes sulfuriques hautement conducteurs (>10 mS/cm)
- ◇ Interface artificielle souple (polymer–ceramic composites) pour limiter les fissures
- ◇ Empilement multicouche compact compatible avec anode lithium-métal

- ◇ Partenariats industriels : Toyota, QuantumScape, Solid Power, ProLogium → pré-séries annoncées dès 2026

#### APPLICATIONS INDUSTRIELLES (2026–2030)

- ◇ Véhicules électriques premium / sportifs (forte autonomie, haute sécurité)
- ◇ Mobilité aérienne / drones stratégiques
- ◇ Équipements embarqués compacts (aérospatial, défense)
- ◇ Stations de recharge mobile / usage militaire

Remarque : la batterie solide est considérée comme la “next-gen” du Li-ion, promise à un déploiement progressif à partir de 2026. Elle reste cependant un défi industriel majeur, tant sur le plan des matériaux que de l’intégration en chaîne.

#### FOCUS – TOROW (FRANCE)

Parmi les technologies émergentes, TOROW développe une batterie sodium-ion à électrolyte solide, basée sur une structure céramique rocksalt monophase, capable de supporter des courants élevés (>5C).

L’anode peut être en sodium ou en lithium métallique, et la densité énergétique visée dépasse 500 Wh/kg. Ce type de cellule combine sécurité, puissance et compacité, et cible à la fois le transport lourd, les VE et le stockage stationnaire massif (intersaisons, V2X).

L’architecture permettrait une industrialisation sur lignes existantes — un point clé pour accélérer la montée en puissance.

## 4. BATTERIES QUANTIQUES (QUANTUM-DOT-BASED)

#### INFORMATIONS DE BASE

Utilisent des nanostructures quantiques pour stocker la charge.

- ✓ Promesses de densité record, sécurité et stabilité extrêmes
- ✓ Résistance thermique potentielle
- ✗ À l’état théorique ou expérimental très précoce

Applications : post-2035 si concrétisées.

#### COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries dites quantiques n’existent pas encore au sens commercial, mais plusieurs équipes de recherche développent des architectures exploitant des effets quantiques de confinement, comme :

- ◇ Quantum dots (points quantiques) : nanocristaux semi-conducteurs agissant comme réservoirs de charge
- ◇ Structures à base de graphène quantique, fullerènes, ou nanotubes dopés
- ◇ Niveaux d’énergie quantifiés permettant une répartition fine des électrons

👉 Ces structures promettent de booster la densité énergétique, la vitesse de charge, la résistance thermique et la longévité des batteries.

Elles ne reposent pas toujours sur le lithium : certaines pistes explorent des matériaux exotiques à faible impact environnemental.

#### MÉCANISMES ANTICIPÉS (EXPÉRIMENTAUX)

- ◇ Stockage par piégeage quantique d'électrons dans des boîtes nanométriques
- ◇ Rétention d'énergie sans perte de tension (idéalement)
- ◇ Comportements de type condensateur quantique sur base de transitions électroniques contrôlées

Aucune réaction standardisée ne peut encore être formalisée ; les prototypes sont souvent à l'échelle de quelques nanomètres.

### PERFORMANCES VISÉES (PROJECTIONS)

Critère	Objectif théorique / visé
Densité gravimétrique	>800 Wh/kg
Densité volumique	>1500 Wh/L
Vitesse de charge	<5 min (selon prototype)
Nombre de cycles	>10 000 cycles
Température nominale	-20 à +100 °C (cibles futures)
Autodécharge	Négligeable

### DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Maîtrise des nanostructures instables → très forte variabilité de comportement
- ◇ Passage au macroscopique : comment assembler des milliards de quantum dots de façon répétable ?
- ◇ Énorme complexité de fabrication : technologies proches de l'électronique avancée
- ◇ Absence de standard, d'électrolyte compatible, et de BMS adapté

### PROGRÈS RÉCENTS

- ◇ Prototypes quantum-dot/graphène hybrides stockant plusieurs charges par entité
- ◇ Dispositifs de stockage quantique-tunable testés pour micro-électronique
- ◇ Études sur la transition batterie/condensateur ultra-rapide, à très haut rendement
- ◇ Dépôt de brevets par Samsung, IBM, plusieurs labos chinois et américains

### APPLICATIONS INDUSTRIELLES (2035+ SI CONCRÉTISÉ)

- ◇ Micro-batteries intelligentes pour implants / nano-robots
- ◇ Électronique quantique / IoT sécurisé
- ◇ Stockage spatial extrême (températures élevées, radiation, compacité)
- ◇ Possiblement VE ou drones, mais à très long terme

Remarque : les batteries quantiques représentent plus une piste de rupture conceptuelle qu'un développement imminent. Elles sont vues comme l'après-solide, avec des promesses énormes... et des incertitudes tout aussi vastes.

## 5. BATTERIES 3D IMPRIMÉES

### INFORMATIONS DE BASE

Utilisent l'impression additive pour déposer des structures d'électrodes en 3D.

- ✓ Ultra miniaturisation possible, intégration à la forme du support
- ✓ Développement rapide (impression basse température)
- ✗ Capacité encore faible, non standardisé

Applications : médical, IoT, électronique embarquée.

## COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries 3D imprimées exploitent l'impression additive (imprimante 3D) pour déposer des électrodes structurées en volume (piliers, réseaux, architectures poreuses).

L'objectif est de conformer la batterie à son environnement physique et d'exploiter une surface active maximale, tout en réduisant l'épaisseur globale.

Typiquement :

- ◇ Électrodes à base d'encres conductrices (graphène, CNT, LiCoO<sub>2</sub> micro-particulaire)
- ◇ Électrolytes solides ou gélifiés imprimés en couches successives
- ◇ Support flexible ou rigide (polymères, silicium, verre...)

## FONCTIONNEMENT

Même principe redox que les batteries classiques, mais les réactions se déroulent dans une géométrie tridimensionnelle contrôlée, souvent intégrée à l'objet (textile, capteur, puce...).

Tension nominale : 1,5 à 4,0 V

Plage utile : dépend du couple redox sélectionné

## PERFORMANCES TYPIQUES (MICROBATTERIES)

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	10–60 Wh/kg (fortement limité)
Densité volumique	~100 Wh/L (optimisation en cours)
Nombre de cycles	>1000 cycles (microbatteries)
Température nominale	-10 à 60 °C

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Capacité encore très faible (format limité, dépôt mince)
- ◇ Matériaux imprimables peu nombreux et souvent peu performants
- ◇ Standardisation inexistante
- ◇ Durabilité mécanique à renforcer dans les applications embarquées

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Électronique portable miniaturisée / IoT / capteurs embarqués
- ◇ Dispositifs médicaux implantables ou portables
- ◇ Cartes électroniques intégrant le stockage d'énergie
- ◇ Textiles intelligents / systèmes militaires légers

## 6. BATTERIES AUTO-RÉPARANTES

## INFORMATIONS DE BASE

Technologies embarquant des polymères ou structures capables de se régénérer après une microfracture.

- ✓ Allongement de la durée de vie des batteries
  - ✓ Maintien de la sécurité dans le temps
  - ✗ Recherches encore limitées, applications lointaines
- Applications : défense, satellites, environnements extrêmes.

## COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les batteries auto-réparantes intègrent des matériaux capables de régénérer leur structure en cas de microfissures, perte de contact, ou rupture de couche active.

Ces fonctions sont rendues possibles par :

- ◇ Polymères dynamiques (liaisons réversibles, ponts H, Diels-Alder...)
- ◇ Électrodes avec agents encapsulés qui se libèrent en cas de stress
- ◇ Interfaces adaptatives (gel ionique, films supramoléculaires)

## RÉACTIONS ÉLECTROCHIMIQUES

Fonctionnement redox classique (Li-ion, Na-ion...), mais avec auto-restauration partielle de la structure électrode/électrolyte après dommage mécanique.

Tension nominale : dépend du système redox choisi

Plage utile : 2,5 à 4,2 V

## PERFORMANCES TYPIQUES (LABORATOIRE)

Critère	Valeur indicative
Densité gravimétrique	100–200 Wh/kg (cible labo)
Nombre de cycles	1500–5000 cycles visés
Taux de récupération	60–90 % de capacité initiale après dommage
Autonomie	inchangée en conditions normales

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Technologie encore très expérimentale
- ◇ Compromis entre flexibilité et conductivité
- ◇ Durée de réparation longue (min à h)
- ◇ Intégration difficile en fabrication de masse

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES (LONG TERME)

- ◇ Systèmes embarqués soumis à vibrations / flexion
- ◇ Équipements spatiaux ou militaires critiques
- ◇ Capteurs autonomes en environnement difficile
- ◇ Véhicules autonomes ou drones sur terrain accidenté

## 7. SUPERCONDENSATEURS HYBRIDES

## INFORMATIONS DE BASE

Combinaison de batteries (stockage électrochimique) et de condensateurs (stockage électrostatique).

✓ Recharge ultra-rapide (<1 min), durée de vie élevée

✓ Très bonne puissance instantanée

✗ Très faible densité énergétique (5–30 Wh/kg)

Applications : bus urbains, levage, hybridation avec batteries.

## COMPOSITION CHIMIQUE & PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les supercondensateurs hybrides associent deux mécanismes :

- ◇ Stockage électrostatique (EDLC) via accumulation de charges à l'interface
- ◇ Stockage électrochimique (pseudo-capacité) via réactions redox rapides

Typiquement :

- ◇ Électrode positive : carbone poreux ou graphène
- ◇ Électrode négative : oxyde métallique ( $\text{MnO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ ) ou polymère conducteur
- ◇ Électrolyte : aqueux, organique ou ionique selon la tension visée

## RÉACTIONS (SIMPLIFIÉES)

- ◇ Accumulation capacitive :  $\text{C} \rightarrow \text{C}^+ + \text{e}^-$  (non faradique)
- ◇ Réaction pseudo-capacitive :  $\text{MO}_x + \text{H}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{MO}_{x-1} + \text{OH}^-$

Tension nominale : 1,5–3,5 V

Temps de charge typique : 5 à 90 secondes

## PERFORMANCES TYPIQUES

Critère	Valeur indicative
Densité énergétique	5–30 Wh/kg
Densité de puissance	>5000 W/kg
Nombre de cycles	>500 000 cycles
Température nominale	-30 à 70 °C
Temps de charge	<1 minute

## DÉFIS TECHNIQUES

- ◇ Très faible autonomie → usage limité sans hybridation
- ◇ Faible tension par cellule → empilage nécessaire
- ◇ Tendance à la décharge rapide si mal gérés

## APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- ◇ Bus électriques / tramways à recharge rapide
- ◇ Systèmes de levage / grues / ascenseurs industriels
- ◇ Hybrides avec batteries Li-ion pour pic de puissance
- ◇ Microgrids avec stockage pulsé / secours instantané

**TABLEAU COMPARATIF DES TECHNOLOGIES DE BATTERIES**

Technologie	Type électrolyte	Densité énergie (Wh/kg)	Cycles typiques	Maturité	Applications clés
Li-ion NMC	Liquide	180–260	1000–2000	Industrielle	VE, outils, smartphone
Li-ion LFP	Liquide	120–170	2500–4000	Industrielle	VE économiques, stockage
Li-ion LCO	Liquide	180–250	500–1000	Industrielle	Électronique portable
Li-ion LTO	Liquide	70–90	>10 000	Industrielle	Bus, chariots, data centers
Plomb-acide (AGM / Gel)	Liquide/gel	30–50	300–800	Mature (ancienne)	Démarrage, secours, solaire
NiMH	Aqueux	60–120	800–1500	Mature	HEV, AA/AAA, médical
Lithium-soufre (Li-S)	Liquide/semi-solide	300–500 (pot. >800)	100–500	Pré-industrielle	Aéronautique, militaire, futur VE
Sodium-ion	Liquide	100–160	1000–3000	En déploiement	Stockage stationnaire, VE légers
Redox-flow (VRFB, Zn-Br...)	Liquide externe	20–50	>10 000	Stationnaire	Réseau, microgrid, off-grid
Aluminium-ion	Ionique / solide	70–150	1000–7000	Précoce	IoT, stockage léger
Zinc-ion / Zinc-air	Aqueux / semi-ouvert	100–150 / 250–350	500–1000 / 1	Limitée / jetable	Audio, stationnaire, défense
Magnésium-ion	Liquide (spécifique)	100–250	200–1000	Expérimentale	Sécurité, stockage stationnaire
Dual-ion (DIB)	Liquide	100–180	1000–3000	Laboratoire	Électronique haute tension
Li-air	Gazeux ouvert	>1000 (théorique)	50–200	Très expérimental	Spatial, drones, long range VE
Semi-solides haute densité	Gel / slurry	250–350	800–1500	En pré-série	VE premium 2025+, industrie
Solides (ASSB)	Solide céram/sulf	300–450	1000–3000	En industrialisation	VE, spatial, défense
Batteries quantiques	Variable (théorique)	>800 (objectif)	>10 000 (objectif)	Théorique	Micro-stockage, IoT, spatial
Batteries 3D imprimées	Gel / solide fin	10–60	>1000	Début de R&D	Médical, IoT, puces
Batteries auto-réparantes	Variable	100–200 (objectif)	1500–5000 visés	Très précoce	Défense, spatial, environnement extrême
Supercondensateurs hybrides	Aqueux / ionique	5–30	>500 000	Industrielle de niche	Bus, levage, hybridation

## PARTIE IV – APPROCHE STRATÉGIQUE ET PROSPECTIVE

### 1. CARTOGRAPHIE DES APPLICATIONS PAR TECHNOLOGIE

Secteur Cible	Technologies adaptées	Raisons principales
VE économiques	LFP, sodium-ion, zinc-ion	Coût modéré, sécurité thermique, durée de vie correcte
VE premium / haut de gamme	NMC (811), batteries solides sulfure/polymère, semi-solides, Li-S (futur)	Densité élevée, stabilité thermique, compatibilité lithium métal
Stockage stationnaire	LFP, sodium-ion, redox-flow, zinc-air	Faible coût/cycle, longévité, sécurité en site fixe
Aéronautique / spatial	Lithium-air, lithium-soufre, batteries quantiques (futures)	Autonomie massique extrême, fonctionnement en environnement hostile
Urbain / courte distance	LTO, supercondensateurs hybrides, NiMH	Recharge rapide, puissance instantanée, fiabilité
Mobilité légère / IoT	Aluminium-ion, zinc-air, imprimées 3D	Miniaturisation, sécurité, intégration dans la forme du support
Hybridation énergétique	Supercondensateurs hybrides, dual-ion, NiMH, redox-flow (microgrids solaires)	Puissance délivrée, recharge rapide, réponse dynamique
Défense / extrême	LTO, auto-réparantes, magnésium-ion	Robustesse mécanique, cyclabilité extrême, sécurité sans solvants

### 2. ENJEUX GÉOPOLITIQUES ET INDUSTRIELS

#### RESSOURCES CRITIQUES : EXTRACTION, DÉPENDANCE, GÉOPOLITIQUE

Ressource	Pays Clés	Rôle dans les batteries	Problème stratégiques
<b>Lithium</b>		Élément central des batteries Li-ion	Traitement dominé par la Chine (>60 % raffinage)
<b>Cobalt</b>		Cathodes NMC, stabilité thermique	Conditions éthiques, dépendance quasi exclusive RDC
<b>Nickel</b>		Haute densité (NMC 811)	Équilibre géopolitique instable
<b>Graphite</b>		Anode (graphite naturel/synthétique)	Graphite : ~95 % raffiné en Chine (source : IEA 2023)
<b>Sodium / Soufre / Aluminium / Zinc</b>	Multi-sources	Sodium, aluminium : abondants, peu critiques. Soufre (issu du raffinage pétrolier) et zinc (Chine, Pérou) : moins critiques aujourd’hui, mais sous surveillance stratégique	Opportunité de souveraineté industrielle
<b>Eau</b>	Monde entier (raffinage)	Utilisée massivement dans l’extraction	Ressource indirectement critique

**Explication :** Le vrai enjeu ne réside pas uniquement dans les réserves minières, mais dans la capacité de raffinage, la maîtrise des procédés chimiques (extraction, purification, synthèse), et dans les brevets liés aux matériaux et électrolytes. La dépendance européenne est aujourd’hui plus chimique que géologique.

La Chine contrôle l’essentiel de la chaîne de valeur (raffinage, cathodes, cellules).  
 Les États-Unis et l’Europe accélèrent leur souveraineté (Inflation Reduction Act, Alliance européenne des batteries).

**POLARISATION INDUSTRIELLE**

<b>Zone</b>	<b>Spécificité industrielle dominante</b>
 <i>Chine</i>	Raffinage, cathodes, cellules, packs, LFP, sodium-ion, redox-flow → hégémonie
 <i>USA</i>	Relocalisation (IRA), focus solides (QuantumScape), batteries sans cobalt
 <i>Europe</i>	Dépendance persistante, montée lente (Northvolt, ACC), focus NMC/LFP/sodium
 <i>Japon</i>	Excellence technique (Toyota, solides), mais affaiblissement industriel global
 <i>Corée</i>	Haut de gamme (LGES, SK, Samsung SDI), NMC premium

**NOUVEAUX ENJEUX STRATÉGIQUES (2025-2035-**

Tensions sur l’eau :

la fabrication des cellules et les procédés de raffinage (lithium, nickel, cobalt) sont fortement consommateurs d’eau industrielle. Cette ressource, souvent négligée, devient stratégique dans les zones arides (plateaux sud-américains, zones désertiques, régions minières d’Afrique). Les risques de conflits d’usage (agriculture, industrie, eau potable) s’accroissent.

Brevets et verrouillages technologiques :

la montée en puissance des batteries solides et hybrides s’accompagne d’une explosion des dépôts de brevets. Ceux-ci concernent notamment : les interfaces solides, les électrolytes non inflammables, les procédés d’empilement multicouches, et les structures nanométriques de confinement ionique. Le contrôle de ces brevets devient un levier stratégique pour bloquer des concurrents ou conditionner l’accès aux marchés.

Standards logiciels, BMS<sup>1</sup> et souveraineté numérique :

Le pilotage électronique des batteries (via les Battery Management Systems – BMS) détermine leur sécurité, leur durée de vie, leur capacité de recharge et leur interopérabilité.

De plus en plus de ces fonctions sont verrouillées par des logiciels propriétaires (firmware, diagnostic, data loggers) qui échappent au contrôle des utilisateurs, voire des États. La multiplication des standards concurrents (CAN, ISO 15118, OCPP, OpenBMS...) complexifie la souveraineté logicielle, et renforce le risque d’asymétrie technologique face à la Chine, aux États-Unis et à la Corée.

Risques d’écosystèmes fermés :

certains acteurs imposent des batteries liées à des infrastructures de recharge, des véhicules ou des plateformes cloud propriétaires. Cela limite les possibilités de maintenance, de réemploi ou de recyclage indépendant. Cette logique de verrouillage par l’écosystème rappelle celle du numérique (Apple, Tesla, Huawei), avec des conséquences stratégiques à moyen terme.

<sup>1</sup> BMS : Battery Management System.

Il est essentiel parce qu’il contrôle l’ensemble de la Batterie, même si la cellule est parfaite.

Son Firmware est souvent propriétaire et donc opaque.

Il définit les limites de sécurité, la capacité utilisable et même la compatibilité avec d’autres chargeurs ou véhicules.

Il peut rendre une batterie inutilisable... ou non recyclable.

Sans BMS, une batterie est inutilisable et un BMS mal maîtrisé, c’est une dépendance numérique invisible.

### 3. SYNTHÈSE COMPARATIVE GLOBALE

Technologie	Densité (Wh/kg)	Cycles	Coût	Maturité	Usage typique
NMC	220–270	1000+	\$\$\$	Commerciale	VE, premium
LFP	150–180	3000+	\$	Commerciale	VE économiques, stockage
LCO	~250	500–800	\$\$\$	Commerciale	Smartphones, électronique portable
LTO	~80	>10 000	\$\$	Commerciale	Bus, secours, militaire
NiMH	60–120	~1500	\$	Commerciale	Hybrides, outillage
Sodium-ion	120–160	1000+	\$	Pré-industrielle	Stockage, VE court rayon
Li-soufre	400–500	200–400	\$	Dév. avancé	Drones, futur VE longue autonomie
Li-air	>1000 (théorique)	<100	\$\$	Expérimental	Spatial, aéronautique
Redox-flow	20–40	>10 000	\$\$	Pilotes	Réseaux, data centers
Zinc-air	80–130	1-100 selon technologie (primaire ou recharge instable)	\$	Pilotes	Off-grid, dispositifs longue durée
Magnésium-ion	~200 (pot. 400+)	<1000 (max)	\$	Laboratoire	Sécurité extrême, industrie future
Quantique	>500 (objectif)	>10 000 (théorique)	\$\$\$	Théorique	IoT, spatial, micro-stockage
Supercaps hybrides	5–30	>50 000	\$	Commerciale	Bus, levage, systèmes mixtes
Solides	300–450	1000–3000	\$\$	Pré-série	VE premium, spatial, défense
Semi-solides	250–350	800–1500	\$\$	En déploiement	VE dès 2025–26 (CATL, Toyota)
Auto-réparantes	100-200 (cible)	1500-5000 visés	\$	Labo / R&D	Défense, spatial, environnement dur
Batteries 3D imprimées	10-60	1000+	\$\$	R&D	IoT, capteurs, dispositifs médicaux

### 4. CONCLUSION

La décennie 2025–2035 verra cohabiter un large spectre technologique, selon les usages, les marchés, les ressources... et la capacité à industrialiser proprement.

Trois mutations sont en cours :

- ◇ Diversification : montée rapide du sodium, du solide, du zinc, et des filières organiques
- ◇ Industrialisation souveraine : la batterie devient un pivot logistique, normatif, logiciel et géopolitique
- ◇ Réinvention du statut de la batterie : ce n’est plus un composant, mais une brique stratégique, au cœur de la transition énergétique et du pouvoir technologique

La batterie ne sera plus un simple “consommable” technologique.

Elle devient une brique stratégique, logistique et industrielle, au cœur de la souveraineté énergétique, de la transition climatique et des grandes infrastructures du XXIe siècle.

## PARTIE V – FAQ : RÉPONSES AUX QUESTIONS FRÉQUENTES ET OBJECTIONS COURANTES (APRÈS DISCUSSIONS SUR LINKEDIN)

### 1. LES BATTERIES LI-MÉTAL NE POSAIENT-ELLES PAS DES PROBLÈMES DE SÉCURITÉ (DENDRITES, COURTS-CIRCUITS) ?

Oui, la formation de dendrites sur l'anode lithium-métal a longtemps limité leur usage :

- ➔ courts-circuits internes,
- ➔ faible durée de vie,
- ➔ risque thermique.

Mais plusieurs verrous ont été levés :

- ◇ électrolytes solides (sulfures, polymères, oxydes) plus stables,
- ◇ interfaces nanométriques pour stabiliser l'anode,
- ◇ optimisation des paramètres de pression et température.

On ne supprime pas totalement les dendrites, mais on sait désormais les contenir, avec des performances cycliques compatibles avec un usage VE (>1 000 cycles dans certains cas).

### 2. LE RECYCLAGE SERA-T-IL ENCORE POSSIBLE AVEC AUTANT DE TECHNOLOGIES DIFFÉRENTES ?

Oui, mais il faudra adapter les procédés.

Les filières actuelles se préparent à accueillir des batteries plus variées, avec :

- ◇ l'écoconception (meilleure démontabilité, ex. Renault),
- ◇ des procédés différenciés (hydrométallurgie, recyclage direct),
- ◇ des diagnostics embarqués pour trier les flux.

Certaines technologies (ex. solides polymères, composites) posent de nouveaux défis, mais elles offrent aussi des structures plus simples (moins de liquide, moins de polymères secondaires).

### 3. LES GIGAFABRIQUES FRANÇAISES SERONT-ELLES COMPATIBLES AVEC LES NOUVELLES TECHNOLOGIES ?

Oui. Les usines françaises (Verkor, ACC, ProLogium...) démarrent avec du NMC ou du semi-solide, mais leur roadmap intègre déjà des adaptations vers le solide ou le sodium-ion (pour autant que ma sagacité n'ait pas été prise en défaut).

Certaines lignes sont reconfigurables, d'autres sont prévues pour évoluer.

La stratégie industrielle française repose sur une cohabitation progressive des technologies, et non une rupture brutale.

### 4. LES ANNONCES D'AUGMENTATION D'AUTONOMIE SONT-ELLES CRÉDIBLES ?

Oui, mais elles concernent des cellules précises en phase pilote, souvent dans des conditions de laboratoire optimisées.

Le chiffre de +80 % vient de la comparaison entre une cellule Li-ion standard (NMC/graphite) et une cellule Li-métal solide de même encombrement, testée en environnement contrôlé.

Les performances finales dépendront du passage en série, des compromis thermiques et des coûts.

## 5. LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE NE REPOSE-T-ELLE PAS ELLE-MÊME SUR DES RESSOURCES FOSSILES ?

En partie, oui — du moins au départ.

Construire des batteries, des réseaux ou des gigafactories nécessite de l'énergie, souvent encore carbonée. Mais c'est une dépense d'amorçage destinée à basculer vers un système à meilleure efficacité énergétique et plus soutenable.

Le véritable enjeu est d'atteindre un retour sur investissement énergétique et stratégique positif, dans un laps de temps réaliste.

## 6. LES BIOCARBURANTS NE SERAIENT-ILS PAS UNE ALTERNATIVE PLUS SIMPLE QUE LES BATTERIES ?

Ils en font partie — mais leur potentiel est limité par :

- ◇ la rareté des matières premières durables (huiles usagées, résidus agricoles),
- ◇ le conflit d'usage avec l'alimentation (cultures énergétiques),
- ◇ la difficulté à industrialiser des volumes suffisants pour remplacer les carburants fossiles.

Le B100 ou le HVO sont des solutions intéressantes pour les flottes professionnelles ou la transition du transport lourd, mais ne suffiront pas pour électrifier massivement le parc léger.

La plupart des scénarios sérieux (IEA, RTE, Shift Project...) considèrent les biocarburants comme un complément, pas un substitut.

## 7. L'OBJECTIF EST-IL VRAIMENT D'AUGMENTER L'AUTONOMIE OU PLUTÔT DE RÉDUIRE LE POIDS ?

Très bonne question : les batteries solides ne visent pas forcément une course au kilomètre, mais plutôt un meilleur rapport poids/énergie.

Un gain de 60–80 % d'autonomie peut aussi être exploité pour :

- ◇ alléger la batterie,
- ◇ réduire l'espace occupé,
- ◇ baisser les coûts de production et les masses roulantes.

Cela ouvre la voie à une nouvelle génération de véhicules sobres, légers ou intermédiaires, comme ceux développés par Kilow ou Lormauto.

C'est un changement de paradigme autant qu'un progrès technique.

## 8. ET LA RÉPARABILITÉ DES BATTERIES ? PEUT-ON LES RÉPARER OU SEULEMENT LES RECYCLER ?

La réparabilité est un enjeu clé souvent sous-estimé dans le débat sur la batterie.

Aujourd'hui, la plupart des packs batterie ne sont pas conçus pour être réparés module par module :

 cela augmente les coûts, les déchets, et rend la maintenance complexe.

Mais cela évolue rapidement.

- ✓ Certaines marques (ex. Renault / Ampère) conçoivent déjà leurs batteries pour être plus facilement démontées, diagnostiquées et réparées.
- ✓ Cela facilite non seulement le recyclage, mais aussi les opérations de reconditionnement partiel (remplacement d'un module défaillant), ce qui prolonge la durée de vie utile.
- ✓ La directive européenne sur l'écoconception des batteries pousse désormais à standardiser, tracer et faciliter la maintenance.

Demain, la batterie ne sera plus un "bloc fermé", mais un ensemble modulaire réparable, traçable, recyclable, à l'image de ce qui se fait déjà dans certains secteurs industriels.

C'est un levier stratégique pour réduire l'empreinte environnementale globale — et une réponse concrète à l'obsolescence programmée.

Pendant longtemps, la batterie a été pensée comme une unité monolithique, scellée, difficile à démonter, diagnostiquer, ou réparer. Cela posait trois problèmes majeurs :

- ◇ Impossible de remplacer un module défectueux sans changer tout le pack
- ◇ Maintenance lourde et réservée à des centres spécialisés
- ◇ Fin de vie accélérée et recyclage précoce, même pour des packs encore partiellement fonctionnels

Mais ce paradigme change vite. Pour trois raisons principales :

### 1. L'ÉVOLUTION DES DESIGNS VERS LA MODULARITÉ

- ◇ Les nouvelles générations de packs, notamment chez Renault / Ampère, sont conçues pour être démontées plus facilement, module par module.
- ◇ Des vis remplaçant les soudures, des connecteurs rapides, et des BMS intelligents (avec diagnostic intégré) permettent d'identifier précisément les cellules faibles à remplacer.
- ◇ Cela ouvre la voie à des réparations en atelier, sans forcément passer par une ligne industrielle.

### 2. LE RECONDITIONNEMENT COMME PROLONGEMENT DE VIE

- ◇ Avant même le recyclage, de plus en plus d'acteurs développent des chaînes de **reconditionnement** : test de capacité, remplacement partiel, et remise sur le marché (seconde vie ou usage prolongé).
- ◇ Cette logique est déjà mature dans certains pays (Corée, Japon) et progresse en Europe.
- ◇ Elle s'applique à des batteries de VE mais aussi à celles de stockage stationnaire ou de mobilité légère.

### 3. LE CADRE RÉGLEMENTAIRE POUSSE À L'ÉCOCONCEPTION

La nouvelle directive européenne sur les batteries impose :

- ◇ la traçabilité des composants,
- ◇ la facilité de démontage sans destruction,
- ◇ l'accès aux pièces détachées pour une durée minimale,
- ◇ la transparence du BMS (état de santé, cycles, capacité restante).

C'est un changement majeur : on passe d'un objet fermé et consommable à une brique technologique réparable et circulaire.

### EN RÉSUMÉ

<b>Avant</b>	<b>Après</b>
Batterie scellée	Batterie modulaire démontable
Changement complet en cas de panne	Réparation / remplacement ciblé possible
Fin de vie = recyclage	Étape intermédiaire = reconditionnement

## SOURCES DOCUMENTAIRES ET TECHNIQUES

### 1. AGENCES INTERNATIONALES & RAPPORTS INSTITUTIONNELS

- ◇ **IEA – International Energy Agency**  
Global EV Outlook, Energy Technology Perspectives, Battery Raw Materials Report
- ◇ **BNEF – Bloomberg New Energy Finance**  
Battery Supply Chain Ranking, Battery Price Survey
- ◇ **US DoE – Department of Energy / Argonne National Lab**  
Battery Performance and Cost Database, Battery 500 Initiative
- ◇ **Commission européenne / JRC**  
Strategic Action Plan on Batteries, Raw Materials Scoreboard, Critical Raw Materials Act
- ◇ **European Battery Alliance (EBA)**  
Roadmaps industrielles et capacités de production

### 2. DONNÉES INDUSTRIELLES ET ENTREPRISES DU SECTEUR

- ◇ **Cellules et modules :**  
CATL, BYD, Panasonic, LG Energy Solution, Samsung SDI, SK On
- ◇ **Innovateurs technologiques :**  
QuantumScape, Solid Power, Amprius, ProLogium, 24M, Natron
- ◇ **Automobile & mobilité :**  
Tesla, Toyota, Hyundai, VW, Stellantis, Renault (Ampère), GM
- ◇ **Acteurs européens :**  
Northvolt, Verkor, ACC, Envision AESC, Varta
- ◇ **IRVE & projets industriels :**  
WellBorne, Farasis, Blue Solutions

### 3. RECHERCHES SCIENTIFIQUES (REVUES & UNIVERSITÉS)

- ◇ **Revues scientifiques :**  
Nature Energy, Joule, Advanced Energy Materials, ACS Energy Letters, Nano Letters
- ◇ **Instituts & universités :**
  - MIT – Massachusetts Institute of Technology
  - Stanford University – Precourt Institute for Energy
  - UC Berkeley – Energy Storage Center
  - CNRS – Chimie du Solide, CEA – Liten / INES
  - Fraunhofer Institute (Allemagne), ETH Zurich

### 4. BASES DE DONNÉES SECTORIELLES & VEILLE TECHNOLOGIQUE

- ◇ **Benchmark Mineral Intelligence**  
Données sur les matériaux critiques et les gigafactories
- ◇ **IDTechEx**  
Rapports sur batteries Li-ion, solides, sodium, Li-S, redox-flow, zinc-air
- ◇ **Avicenne Energy**  
Analyse du marché mondial batterie / mobilité électrique
- ◇ **Battery University**

Modules techniques (niveau ingénieur)

- ◇ **CleanTechnica**  
InsideEVs – Dossiers techniques et décryptages industriels

## 5. VEILLE GÉOPOLITIQUE ET RÉGLEMENTAIRE

- ◇ **World Bank**  
Cartographie des ressources stratégiques
- ◇ **USGS — United States Geological Survey**  
Réserves, production, raffinage (lithium, cobalt, nickel...)
- ◇ **Ademe, RTE, Bpifrance**  
Données France (IRVE, stockage stationnaire, stratégie batteries)
- ◇ **Connaissance des Énergies**  
Synthèses prospectives batteries et mix électrique
- ◇ **Lois & règlements**  
Inflation Reduction Act (USA), Critical Raw Materials Act (UE)

## NORMES & PROTOCOLES LOGICIELS / BMS

- ◇ **Gestion batterie & sécurité :**  
ISO 12405 (essais), ISO 26262 (sûreté fonctionnelle), IEC 62660 (performances cellule), SAE J2464 (sécurité)
- ◇ **Communication / BMS :**  
CAN-BMS 2.0, openBMS, Modbus, CANopen
- ◇ **Recharge & interopérabilité :**  
ISO 15118 (V2G), IEC 61851 (charge AC/DC), OCPP 2.0.1 (protocole borne/serveur)

## 7. SOURCES SECONDAIRES & VULGARISATION SÉRIEUSE

- ◇ Chaînes techniques YouTube :
  - Just Have a Think – Analyse énergétique & climat
  - Engineering Explained – Véhicules & technologies batterie
  - Undecided with Matt Ferrell, Tech Ingredients
- ◇ Chaînes académiques :
  - MIT OpenCourseWare (OCW) – Cours complets sur l'électrochimie, la technologie batterie
  - EPRI, IEEE Spectrum – Webinaires & modules experts
- ◇ Sites spécialisés :
  - Les Numériques (batteries grand public), Green Car Congress, Battery Tech Expo