



**BATTERIES**  
*de combat*



**GICCAT**

## BATTERIES DE COMBAT

### SYNTHESE

**L'énergie est devenue l'un des facteurs déterminants de la supériorité opérationnelle.**

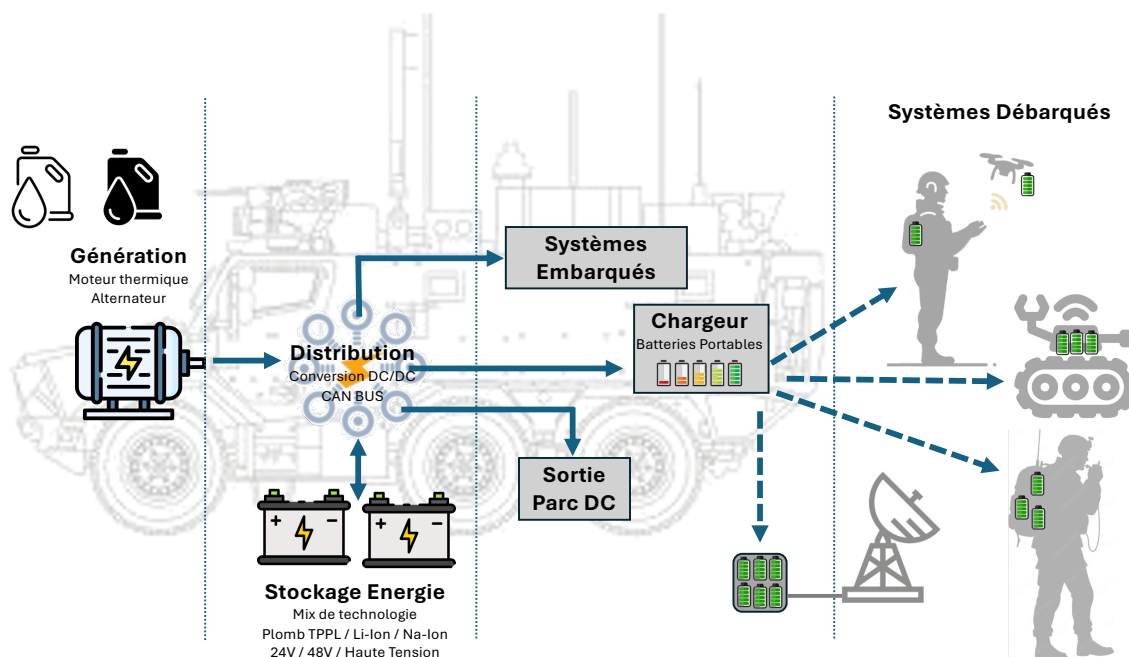
Au fil des ans, l'énergie est devenue un facteur discret mais déterminant de la puissance militaire. Elle alimente chaque action du combattant moderne. À mesure que le champ de bataille se numérise et que se généralisent systèmes autonomes, robotisation et intelligence artificielle, l'électricité devient l'oxygène invisible de la manœuvre. Sans elle, les plateformes les plus avancées s'immobilisent et les soldats, privés de leurs « sens augmentés », redeviennent vulnérables.

Ce rapport est l'aboutissement de dix-huit mois de travaux menés, sous l'égide du GICAT, par des industriels, des opérationnels, des experts de l'État et des chercheurs. Il dresse un état des lieux clair de la dépendance croissante des forces terrestres à l'énergie et analyse technologies, usages, contraintes et évolutions. Il pointe les fragilités et dépendances, mais aussi les opportunités à saisir, à condition d'agir avec détermination.

#### *L'énergie, clé de la supériorité opérationnelle*

Le soldat du XXI<sup>e</sup> siècle est devenue une plateforme électronique mobile : radios, navigation, capteurs biométriques, vision nocturne, drones de reconnaissance. Tous exigent une alimentation fiable, continue et robuste. Les besoins ont fortement augmenté : une mission de 72 heures, autrefois couverte par quelques centaines de Wh, pourrait bientôt nécessiter près de 2000 Wh.

Les véhicules terrestres suivent la même évolution. Les plateformes SCORPION consomment plusieurs kilowatts, même à l'arrêt, en raison de la densité de systèmes embarqués. L'énergie n'est plus un simple soutien logistique : elle devient un levier de supériorité, un multiplicateur de forces et un élément structurant de la manœuvre.



***Batteries de combat : héritages et transitions***

S'agissant de stockage de l'énergie électrique, les ruptures technologiques naissent désormais principalement dans l'automobile et les laboratoires civils, plus que dans les industriels de la défense. Le lithium-ion, pilier de la mobilité électrique, offre des performances inimaginables il y a vingt ans. Ses variantes (LFP, NMC, NCA) permettent d'arbitrer entre densité énergétique, sécurité, durée de vie et coût.

Les pistes émergentes (tout-solide, sodium-ion, architectures 800V, intégration « cell-to-pack ») annoncent des systèmes plus sûrs, plus compacts et plus performants. La défense profitera de ces avancées, mais devra les adapter à ses contraintes : chocs, températures extrêmes, vibrations, agressions balistiques et environnements électromagnétiques.

L'Europe cherche à construire une industrie de la batterie de combat à la hauteur de ses ambitions, mais la souveraineté énergétique reste lointaine. Les matières premières clés (lithium, nickel, cobalt) sont majoritairement extraites, raffinées et contrôlées hors du continent, ce qui entretient une dépendance à des chaînes d'approvisionnement peu maîtrisées. Malgré l'émergence d'acteurs français prometteurs et une R&D structurée, le cœur stratégique de la valeur demeure largement externe.

Dans ce contexte, intégrer une batterie à un système militaire relève d'un exercice d'équilibriste : survivre à des chocs, vibrations et températures extrêmes, contraintes balistiques et risques d'emballement thermique.

Les batteries débarquées sont largement utilisées dans les armées depuis une dizaine d'années. La BB-2590/U, employée dans plus de 90 applications, illustre une standardisation bénéfique pour la logistique et l'interopérabilité. La diversité des formats, des connecteurs et des systèmes de charge reste toutefois un frein majeur.

Les véhicules blindés évoluent vers des architectures hybrides ou tout-électriques, avec des gestions thermiques de plus en plus sophistiquées. Le domaine des batteries embarquées est donc en pleine mutation. Le passage au lithium-ion ouvre des gains importants (masse, autonomie, réactivité), mais impose une vigilance accrue : thermique, sécurité incendie, intégration en volumes contraints et compatibilité avec les architectures existantes.

Adapter ces technologies civiles au monde militaire (y compris pour les missiles et les systèmes stationnaires) n'est pas un simple transfert : c'est une transformation, avec des normes plus strictes, des essais plus lourds et des risques plus élevés. Le BMS, véritable « système nerveux » de la batterie, devient central pour la sécurité et la durée de vie. La standardisation des interfaces et des protocoles est un levier clé pour réduire les coûts et simplifier la logistique.

La mutation la plus silencieuse concerne peut-être la logistique : le lithium-ion exige un entretien actif, un stockage contrôlé, un diagnostic continu et un transport réglementé. Le rapport recommande la mise en place de conteneurs MCO projetables (ateliers énergétiques capables de maintenir plusieurs centaines de batteries) ainsi que des chargeurs universels, robustes et intelligents, pour accompagner la manœuvre jusqu'au dernier kilomètre.

***Orientations stratégiques***

Les travaux du groupe de travail font ressortir plusieurs priorités :

- Généraliser le lithium-ion dans les systèmes terrestres.
- Rendre le BMS obligatoire sur toutes les batteries de combat.
- Réutiliser, quand c'est possible, des designs déjà qualifiés pour réduire coûts et délais.
- Standardiser formats, interfaces et protocoles.
- Accélérer l'hybridation des véhicules et intégrer l'énergie dès la conception.
- Structurer une doctrine énergétique de l'armée de Terre (production, distribution, stockage).

L'énergie n'est plus un simple appui : elle conditionne désormais la manœuvre. La maîtrise des batteries détermine l'autonomie, la mobilité, la résilience et la supériorité opérationnelle des forces terrestres. Ce rapport invite donc à traiter l'énergie non comme un sujet purement technique, mais comme un enjeu stratégique majeur de la puissance militaire de demain.

## **BATTERIES DE COMBAT**

<b>1. Pourquoi ce rapport... et comment ?</b>	<b>5</b>
1.1. L'énergie sur le champ de bataille	5
1.2. Le contexte de ce GT	5
1.3. Organisation du rapport	6
1.4. Un peu de terminologie	6
<b>2. Panorama actuel technologique et industriel</b>	<b>6</b>
2.1. Les batteries dans le monde industriel civil	6
2.2. Panorama actuel des batteries de combat : du combattant débarqué au système autonome	9
2.3. Cas des piles	14
<b>3. Roadmap « civile » 2030+</b>	<b>16</b>
3.1. La naissance d'un marché européen de la batterie	16
3.2. Les principaux acteurs de la batterie en France	16
3.3. Quelles sont les chimies utilisées aujourd'hui ?	17
3.4. Éléments menants sur l'évolution des chimies actuelles	17
3.5. Feuille de route EU des batteries Li-ion	17
3.6. Quelles seront les chimies post 2030 ?	18
3.7. Quelle R&D menée à l'échelle nationale ?	18
3.8. Ailleurs dans le monde	19
<b>4. Les matières premières</b>	<b>21</b>
4.1. État des lieux des besoins et des capacités industrielles françaises	21
4.2. Disponibilité des matières	22
<b>5. Vision de l'armée de Terre</b>	<b>23</b>
5.1. L'énergie électrique : facteur déterminant de la supériorité opérationnelle	23
5.2. Les deux principaux composants : groupes électrogènes et batteries	23
5.3. Situation actuelle	24
5.4. Attentes et conclusion	25
<b>6. Intégration dans des systèmes</b>	<b>26</b>
6.1. Intégration sur véhicules blindés	27
6.2. Intégration sur missiles	28
6.3. Stationnaire : Energy Storage System	30
<b>7. Spécificités de défense</b>	<b>31</b>
7.1. Militarisation de solutions civiles ou développements spécifiques	31
7.2. Standardisations	32
7.3. Normes issues du monde civil	33
7.4. Qualifications et/ou sur spécifications du monde de la défense	38
<b>8. Environnement logistique</b>	<b>42</b>
8.1. Batteries lithium-ion : adapter la logistique militaire	42
8.2. Solutions logistiques	43
8.3. Seconde vie – Recyclage	48
<b>9. Synthèse – Perspectives</b>	<b>50</b>
9.1. Croisement technologies – applications défense	50
9.2. Verrous stratégiques à lever	52
<b>10. Compléments</b>	<b>54</b>
10.1. Membres du GT	54
10.2. Liste des auditions	55
10.3. La démarche prospective capacitaire : trois paradoxes énergétiques	56
10.4. Focus sur la Battery Regulation	57

# 1. Pourquoi ce rapport... et comment ?

## 1.1. L'énergie sur le champ de bataille

L'énergie, notamment l'énergie électrique, est partout. Qui n'a pas pesté lorsque son téléphone s'éteint car sa batterie est vide ? Qui n'a pas regretté de ne pas avoir la bonne connectique ou être loin d'une prise électrique dans ces moments-là ? Sans énergie électrique, même le meilleur outil technologique devient... une décoration élégante.

C'est en particulier vrai sur le champ de bataille. Sans énergie fiable, nos soldats sont des fantassins privés de voix, nos véhicules deviennent des coquilles vides, nos drones se transforment en plumes au vent et nos systèmes de communication en échos lointains, sans parler des besoins énergétiques grandissants de l'intelligence artificielle.

La disponibilité de l'énergie, et notamment des batteries destinées aux combattants et à leurs plateformes, est d'une importance stratégique pour les forces terrestres.

Le soldat du XXI<sup>e</sup> siècle est une plateforme de systèmes électroniques ambulante. Radios tactiques, systèmes d'aide à la navigation, ordinateurs de terrain, capteurs biologiques, drones de reconnaissance, outils de vision nocturne, ... tous nécessitent une énergie fiable. Ces dispositifs sont le « 6<sup>e</sup> sens » des combattants sur le terrain. Et les besoins de mobilité et d'autonomie sont de plus en plus importants.

Le nombre et la nature des systèmes d'armes dépendants de l'énergie électrique (drones, systèmes de communication, systèmes embarqués, etc.) vont aller en grandissant et intégreront des capacités énergivores : la robotique, l'IA, ... jusqu'au niveau du combattant. La numérisation des champs de bataille accroît la dépendance du combattant aux équipements électroniques, multipliant la consommation énergétique des véhicules militaires depuis 2010 avec un facteur compris entre deux et cinq. Les besoins en puissance de plusieurs kW et l'autonomie énergétique deviennent critiques, comme le montre le programme SCORPION : GRIFFON, JAGUAR, SERVAL consomment plusieurs kW même à l'arrêt : la performance opérationnelle dépend directement de la batterie.

En clair, l'emploi des batteries, leur développement et leur maîtrise conditionneront l'efficacité des forces armées, tout en renforçant la souveraineté des acteurs concernés.

## 1.2. Le contexte de ce GT

Ce rapport présente les analyses et réflexions d'un groupe de travail (GT) du GICAT sur les batteries de combat, GT issu du besoin opérationnel esquissé ci-dessus et impliquant les industriels (GICAT : Groupement des industries françaises de défense et de sécurité terrestres et aéroterrestres : <https://www.gicat.com>). Il fait suite à de précédentes réflexions tenues au sein du GICAT pour des GT similaires :

- Mobilité, robotisation, énergie et soutenabilité (2018-2019)
- Énergie électrique embarquée (2020-2021)
- Gestion de l'énergie électrique véhicule-flotte-camp (2021-2023)

Ces derniers travaux avaient préconisé une étude spécifique sur les batteries de combat terrestre.

Le présent GT a impliqué durant environ 2 ans les industriels du secteur, les étatiques concernées (EMAT, DIEO, DGA, AID) et des académiques (CEA). L'approche collaborative, ouverte et toujours confiante fut constante pour avancer collectivement. C'est pourquoi, bien qu'établi sous l'égide du GICAT, groupement d'industriels qui seul revendique la responsabilité de ce rapport, ce GT a impliqué des opérationnels de terrain, des gestionnaires d'énergie, des fabricants de batteries, des intégrateurs de batteries, des testeurs de batteries, des « acheteurs » de batteries ou de systèmes incluant des batteries, des chercheurs.

L'objectif principal de ces travaux est d'analyser le contexte et les exigences spécifiques des batteries utilisées dans un environnement militaire terrestre pour identifier les lignes de force pour permettre une bonne intégration des solutions à venir, notamment lithium, au profit des forces.

De ces travaux, sont exclus les applications navales et aériennes.

### ***1.3. Organisation du rapport***

Les avancées technologiques dans le domaine des batteries sont majoritairement issues du monde civil, notamment liées à la mobilité électrique. Un état des lieux des grandes tendances technologiques du monde industriel civil est donc posé avant de présenter un panorama du monde actuel de la batterie de combat terrestre qu'elle soit embarquée ou débarquée.

Le chapitre 3 est tournée vers l'avenir et s'intéresse à la *road-map* civile des évolutions technologiques.

Souveraineté et indépendance stratégique devraient être la règle, notamment dans le domaine stratégique de la défense nationale. Le chapitre 4 montrera que c'est un point dur, a minima pour les cellules de base des batteries, matières premières et capacité de raffinage n'étant pas vraiment dans les giron français, voire européens.

La présentation des enjeux et défis de l'énergie pour les engagements futurs de l'armée de Terre forme le chapitre 5.

Au-delà du combattant débarqué, des batteries sont intégrées dans des systèmes plus complexes. Les cas des véhicules blindés et des missiles sont traités au chapitre 6.

Même issues directement du monde civil via les cellules, les batteries de combat doivent s'adapter aux spécificités militaires, que ce soit en termes d'environnement, de processus d'acquisition, d'intégration dans des systèmes complexes ou de qualifications, de normes et de sécurité. C'est le sujet du chapitre 7.

Leur environnement logistique, particulièrement important, paraît à redéfinir - voir le chapitre 8.

Enfin, le chapitre 9 synthétise les réflexions et propose des orientations.

### ***1.4. Un peu de terminologie***

Massivement employée dans les forces armées, la batterie de combat terrestre est définie comme un moyen de stockage d'énergie électrochimique destiné aux opérateurs dans un environnement militaire terrestre. Cette définition inclut divers types de chimie et de solutions, ainsi que des notions de batteries primaires et secondaires.

Les batteries primaires sont celles qui ne peuvent pas être rechargées après usage, tandis que les batteries secondaires peuvent être rechargées et réutilisées. Les technologies de batteries incluent le plomb-acide, le nickel-cadmium, le nickel métal hydrure, et les batteries au lithium, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. En particulier, les batteries au plomb-acide sont souvent utilisées dans les véhicules militaires pour leur robustesse et leur coût relativement bas, mais elles sont lourdes et ont une densité énergétique plus faible comparée aux batteries au lithium.

Les performances attendues varient en fonction des opérateurs et des applications, résultant toujours d'un compromis entre plusieurs facteurs.

Ses performances résultent toujours, en fonction de sa destination et emploi, d'un compromis entre, en particulier, autonomie, puissance, encombrement, cout y compris de possession sur son cycle de vie et sécurité d'emploi.

De plus, l'approche du concept de batterie de combat doit englober des éléments secondaires qui peuvent être critiques et qui recouvrent aussi bien le sujet de la souveraineté que celui de la logistique, points cruciaux compte tenu de la courbe croissante d'électrification du champ de bataille.

## **2. Panorama actuel technologique et industriel**

### ***2.1. Les batteries dans le monde industriel civil***

« Le stockage d'énergie électrique est ancien : un développement continu et des innovations majeures permettent un développement littéralement exponentiel. »

Le stockage d'énergie électrique est ancien et repose sur plusieurs technologies et chimies. La technologie plomb-acide, mature depuis plus d'un siècle, équipe encore aujourd'hui la majorité des véhicules pour le démarrage et le réseau de bord, notamment grâce à ses bonnes performances à froid. Elle présente toutefois

des limites en densité énergétique et en intégration<sup>1</sup>. L'évolution des architectures véhicule (hybridation, véhicules électriques, réseaux 48 V) ainsi que de potentielles évolutions réglementaires en Europe pourraient favoriser des technologies alternatives plus efficaces.

Depuis la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, des progrès majeurs ont été réalisés, notamment sous l'impulsion du secteur de l'électronique grand public. Les technologies NiCd puis NiMH ont permis d'augmenter la densité énergétique au-delà de 100 Wh/kg et de soutenir la portabilité et l'électrification de nombreux équipements, y compris certains véhicules hybrides.

La technologie Lithium-ion, développée depuis plus de 40 ans et largement déployée depuis les années 1990<sup>2</sup>, a rendu les véhicules électriques viables à grande échelle. Elle se décline en de nombreuses électrochimies (LFP, NMC, LCO, etc.) et configurations de cellules (cylindriques, poche, prismatiques), selon les compromis recherchés entre énergie, puissance, sécurité, coût et durabilité. Aujourd'hui, les cellules LFP (Fer-Phosphate) atteignent environ 200 Wh/kg, tandis que les NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt) dépassent 300 Wh/kg, avec une progression continue.

En parallèle, des technologies émergentes sont à l'étude, telles que les batteries à électrolyte solide, Li-soufre ou Li-air. Bien que leur maturité industrielle soit variable, elles laissent entrevoir des gains significatifs de performances à moyen et long terme. L'optimisation des matériaux, des électrolytes et de l'intégration système permet déjà d'augmenter la densité énergétique et la tension des batteries.

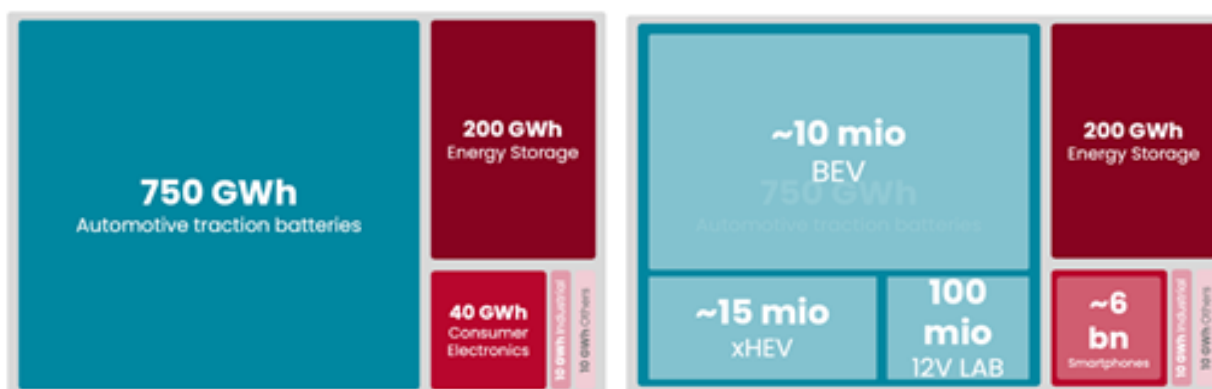
Chaque application ayant des exigences propres, le choix technologique doit rester strictement fonction de l'usage visé.

Le secteur de la défense bénéficiera directement des avancées issues du domaine civil, en particulier de l'automobile.

### 2.1.1. Le secteur de la défense bénéficiera des avancées civiles, notamment liées à l'automobile

L'analyse de la production mondiale montre que l'électronique grand public domine en nombre de batteries, tandis que l'automobile est largement en tête en termes de capacité produite (GWh), avec environ 750 GWh en 2023. Cette dynamique pousse l'industrie à investir massivement pour améliorer performances, sécurité, coûts et empreinte environnementale afin de rendre les véhicules électriques compétitifs, voire supérieurs, aux véhicules thermiques.

Si le secteur de l'automobile est le plus demandeur d'énergie, c'est le secteur de la mobilité « électronique » qui intègre le plus d'utilisateurs.



Domaines d'usage des batteries électriques (source : FEV)

<sup>1</sup> Inventée en 1859 par le physicien français Gaston Planté, la batterie au plomb

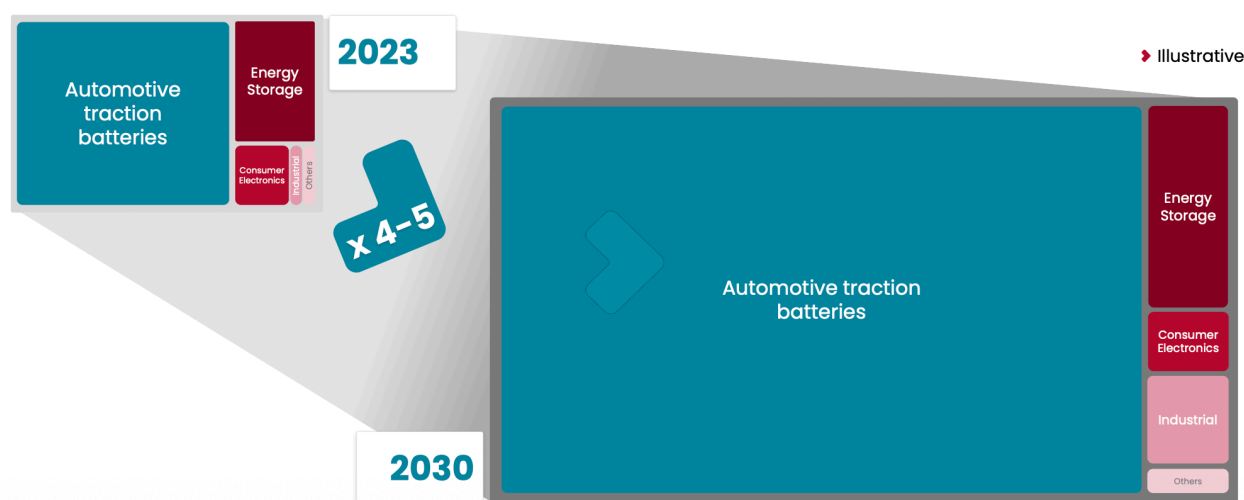
<sup>2</sup> Les batteries au lithium sont nées en 1979 et ont été considérées, dès le départ, comme une véritable révolution. En 2019, les pères fondateurs de cette technologie, Stanley Whittingham, John Goodenough et Akira Yoshino, ont reçu le prix Nobel de chimie.

Le secteur automobile est aujourd'hui un moteur majeur de l'innovation Lithium-ion, porté par une forte compétition entre fournisseurs de cellules et constructeurs. Les projections, basées sur les réglementations et tendances de marché, suggèrent une multiplication par 4 à 5 de la production de batteries automobiles d'ici 2030. Les besoins varient fortement selon le niveau d'électrification, conduisant à des architectures, puissances et électrochimies très différentes entre véhicules hybrides et véhicules 100 % électriques.

## Global annual production of batteries is expected to grow significantly by 2030, at a factor between 4,5 and 5, to reach approximately 4 to 5 TWh

FEV  
CONSULTING

2023 GLOBAL BATTERY PRODUCTION



Automotive Traction batteries contain also hybrid batteries as well as 12 V SLI (Starter Lighting Ignition, mostly lead acid)  
Sources : International Energy Agency (IEA), Benchmark Materials, Roland Berger, FEV

18

Évolution de ces domaines d'usage (source : FEV)

Ces éléments soulignent l'importance de suivre de près l'évolution du marché automobile pour en extraire les tendances et bonnes pratiques applicables aux autres secteurs.

### 2.1.2. Batteries automobiles : Situation actuelle et tendances majeure

Dans le cadre des politiques de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, les gouvernements encouragent fortement le déploiement des véhicules électriques. Au-delà des premiers adopteurs, le marché attend une autonomie, un coût global, des performances et une fiabilité équivalentes, voire supérieures, aux véhicules thermiques, ce qui est déjà le cas, la fiabilité des véhicules électriques étant d'ores et déjà plus importantes.

Trois axes structurent les développements actuels des BEV :

- une plage d'utilisation élargie (autonomie, recharge rapide, performances en conditions extrêmes, durabilité) ;
- un coût réduit, la batterie restant l'élément le plus onéreux de la chaîne de traction ;
- une sécurité de fonctionnement irréprochable.

Ces cibles se traduisent en innovations système telles que le cell-to-pack, l'architecture 800 V, la charge ultra-rapide, le contrôle de la propagation (emballage) thermique ou encore l'optimisation interne des cellules. Parmi les tendances majeures figurent l'amélioration des matériaux Li-ion, les électrolytes solides, le sodium-ion, l'intégration avancée des packs, l'adaptation aux nouvelles réglementations et les exigences accrues en recyclabilité.

Globalement, dix principales tendances (technologiques) se font jour.

⚠️ Top 3 factors for buyers	🔋 Main battery focus areas	🔧 Battery technology trends
<b>Usability</b> 	Higher range Fast charging Enhanced performance	<b>Key selected trends</b> Higher Ni-share cells Solid-state batteries Tableless design Higher Si-share in anode Cell-to-Pack
	Affordable chemistry Reduce mass/pas. materials Modularity	Larger cells Cell-to-Chassis Aluminum short busbars Unified cells
	5-minutes rule TR 0 thermal propagation Crash resistance	Reversible HV disconnect solutions Glass-fiber composite UBP Solid-state batteries Intelligent busbars

TR = Thermal Runaway; CtP = Cell-to-Pack; CtC = Cell-to-Chassis; TMS = Thermal Management System; UBP = Underbody protection plate

Principaux critères d'achat (source FEV)

- 1 **New Lithium-ion chemistries**
- 2 **Solid-state batteries**
- 3 **Na+**  
**Sodium-ion batteries**
- 4 **Cell format, modularity & pack internals**
- 5 **Cell-to-Pack (CtP) & Cell-to-Chassis (CtC)**
- 6 **Local & Worldwide Regulations**
- 7 **Safety measures**
- 8 **800 V Technology**
- 9 **High-power charging (incl. swapping)**
- 10 **Battery recycling**

Tendances technologiques (source : FEV)

### 2.1.3. Synthèse

Les batteries Lithium-ion sont aujourd'hui une technologie mature, bénéficiant de plus de 30 ans de développement et d'un fort retour d'expérience dans le secteur automobile. Malgré des défis persistants, leurs avantages sont largement validés industriellement.

De nouvelles innovations, tant au niveau des électrochimies que de l'intégration système, continueront d'améliorer les performances, la sécurité et les coûts. À ce titre, l'automobile constitue un secteur de référence pour capter les tendances technologiques et les bonnes pratiques.

Enfin, chaque application ayant des exigences spécifiques, la sélection de la technologie batterie doit être intégrée très tôt dans le processus de développement.

## 2.2. Panorama actuel des batteries de combat : du combattant débarqué au système autonome

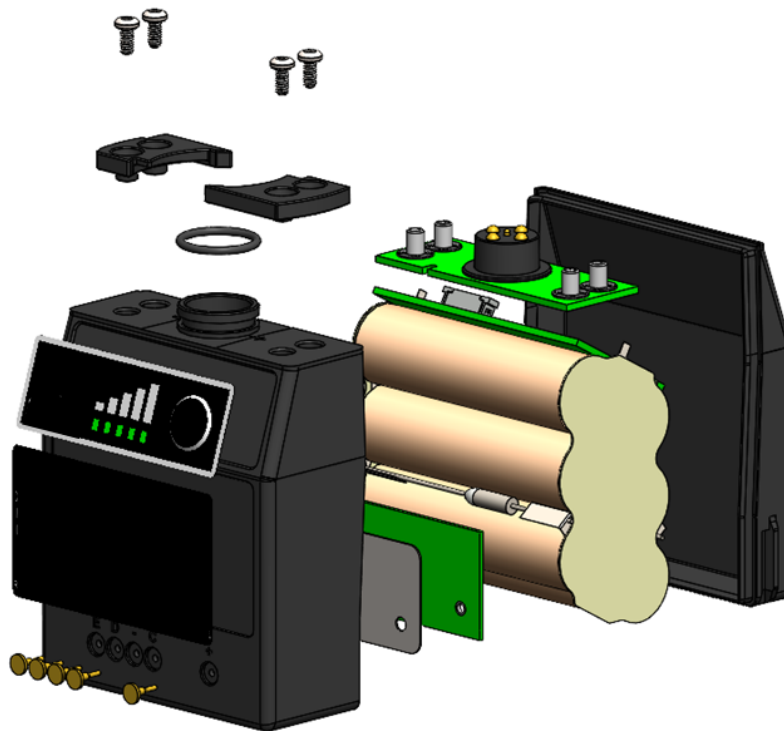
Le monde des applications militaires, fondé sur des technologies duales, reste freiné dans le domaine des batteries embarquées par les problématiques d'acceptation du risque qui sont au cœur de notre sujet.

### 2.2.1. Caractérisation du domaine : l'environnement militaire terrestre

Le domaine de la batterie de combat, qui répond à des spécificités d'emplois militaires, est aussi vaste que l'usage des batteries lithium-ion dans le monde industriel civil. Cependant, le monde de la défense ne

représentant pas un volume majeur par rapport aux usages de la société civile, la dualité y est très forte à de rares exceptions, très spécifiques.

Les composants électroniques tels que les microprocesseurs ainsi que les éléments électrochimiques sont issus des standards mondiaux. Les protocoles de communications tel que le SM-Bus ou CAN-Bus sont également issus du monde civil. C'est le savoir-faire technologique des industriels dans la conception électronique (Battery Management System de control), mécanique et thermique (résistances aux agressions externes, résistance à l'immersion, aux chocs et vibrations...etc) ainsi que logicielle (firmware de pilotage du BMS et communication de l'état de la batterie en temps réel) qui vont en faire un produit spécifiquement défense, répondant à des normes contraignantes, en particulier en Europe.



*Vue type d'une batterie rechargeable pour alimentation de moyens de radio-communication  
(source : BrenTronics)*

L'environnement militaire terrestre impose des contraintes spécifiques sur les batteries, telles que la résistance aux chocs, aux vibrations, aux tirs et explosions, aux températures extrêmes et à l'humidité qui complexifient leur fabrication, usage et recharge.

Il n'y a pas, et il en peut y avoir, malgré une nécessaire normalisation, y compris des systèmes de charge, de batterie universelle militaire.

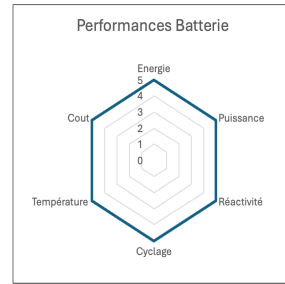
Les priorités pour les batteries de combat incluent l'autonomie, la puissance, l'encombrement et la sécurité. Chaque application a ses propres exigences spécifiques. En plus des performances de base, des éléments secondaires comme la logistique et la maintenabilité sont également critiques. Il est donc essentiel de considérer l'ensemble du cycle de vie des batteries, y compris leur utilisation sur le terrain et les aspects logistiques associés.

## Compromis entre

- l'énergie disponible (Ah ou Wh)
- la puissance disponible (A ou W)
- la réactivité (sécurité)
- la durée de vie (nombre de cycle)
- le comportement en température (-40°C / +90°C)
- le cout de possession (Euros)

## Eléments secondaires parfois critiques à intégrer :

- Moyens de charges intégrés / spécifiques / universels/rapidité
- Logistique et Transportabilité
  - Packaging
  - IATA - UN HazMat Class9



*“Roue de la performance” d’une batterie militaire (source : BrenTronics)*

Schématiquement, les batteries de combat, malgré leur diversité, peuvent être regroupées en deux ensembles complémentaires :

Le monde de la batterie débarquée dont l’usage est maîtrisé par les forces et celui des batteries embarquées qui reste en pleine transition technologique.

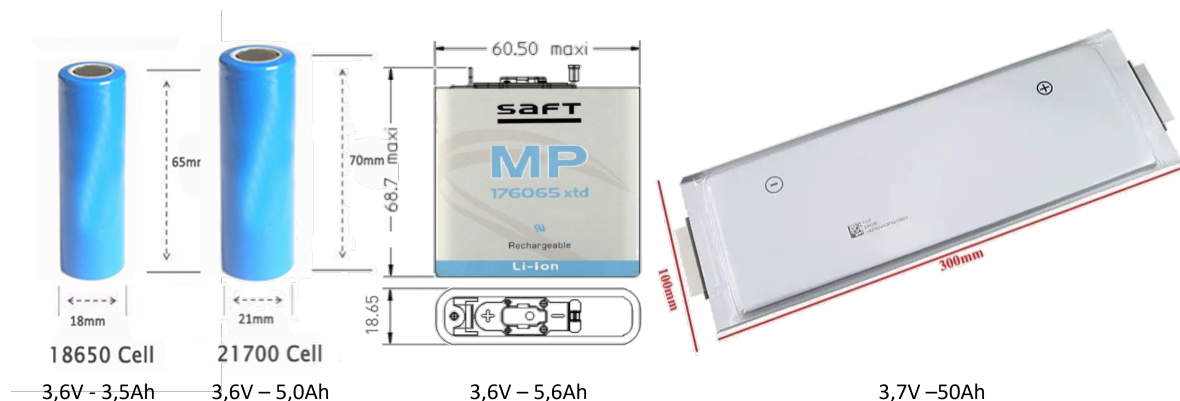
### 2.2.2. Focus sur les batteries débarquées, usage maîtrisé par les forces

Au sein des forces armées, l’usage des batteries au lithium-ion, technologie déployée dès le début des années 1990, a progressivement été maîtrisé depuis sa généralisation dans les années 2000. Son usage est particulièrement diversifié dans une logique identique à celle du monde industriel civil (consumer market).

Au-delà de la diversité des packs de cellules et de chimie adaptées, ce qui fait le système spécifique militaire reste l’interfaçage mécanique, électrique et logiciel avec le système à alimenter (emballage et connectique).

La batterie de type BB-2590/U est usitée pour plus de 90 applications militaires différentes.

Elle est conforme à la Mil-Perf 32383. Cette référence répandue au sein de l’OTAN et autres pays amis est une ébauche de standardisation avec une utilisation de définition stabilisée dans de nouveaux programmes (qualification récente de la BB-2590/U pour le programme MMP ou Radar MURIN). Au-delà de la normalisation mise en œuvre par les industriels (connecteurs, interopérabilité système de charge), il appartient à l’État d’encourager la démarche, en analysant dans ses expressions de besoin les justes spécifications nécessaires<sup>3</sup>.



<sup>3</sup> On peut se poser la question de l'utilité de l'imposition de contraintes de protection ECM pour des batteries nativement isolées.

Types de cellules (source : SAFT)

### 2.2.3. Des batteries embarquées, en pleine transition technologique

Tiré de l'essor des batteries au lithium embarquées dans le monde industriel civil, mais surtout par une augmentation du besoin d'Énergie dans les véhicules militaires, l'usage de la batterie embarquée au lithium se diffuse très progressivement au gré des cultures juridiques régaliennes, de l'acceptation du risque et des expressions de capacités opérationnelles.

La maturité des technologies duales lithium-ion, principalement développées dans le secteur civil, apportent des ruptures technologiques significatives. Le lithium, en particulier, est une technologie clé du XXI<sup>ème</sup> siècle, offrant des performances supérieures par rapport aux technologies plus anciennes comme le plomb.

De fait, les besoins cumulés et croissants d'énergie pour les fonctions démarrage, batterie de service (alimentation des équipements de bord) et traction imposent une réflexion sur l'hybridité ou le tout électrique.

## Lithium 6T Vs Lead Acid 6T

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Weight Saving</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Drop-in replacement of 2 to 3 current 12V lead -acid 6Ts</li> <li>• 20Kg vs 80kg or 120 kg</li> </ul> </li> <li>• <b>High Energy capacity</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 to 3 times more capacity</li> <li>• 2.7 kWh to 3.2 kWh vs 0.96 kWh @C1</li> </ul> </li> <li>• <b>High Specific energy</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 to 7 times more specific energy</li> <li>• 114Wh/kg to 147Wh/kg vs 24Wh/kg</li> </ul> </li> <li>• <b>DoD cycle capability</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Up to 100% vs 60% max</li> </ul> </li> <li>• <b>Long Life cycle</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 times more life cycle</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fast charging</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Charge time less than 1 hour vs 9 hours</li> </ul> </li> <li>• <b>Maintenance free</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• One charge every two years when stored vs 3 months shelf life</li> <li>• SOC indicator vs No indicator</li> </ul> </li> <li>• <b>Battery Monitoring</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• J1939 CAN bus interface vs No communication</li> </ul> </li> <li>• <b>Ease of Installation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No restriction on orientation vs One single possible orientation</li> <li>• No ventilation required vs Ventilation for gas exhaust</li> </ul> </li> </ul> |
|--|---|

### Comparaison Lithium 6T / Lead Acid 6T

En France, de nombreux démonstrateurs (VAB ARLAD, GRIFFON, ULTRO) équipés de batteries LITHIUM ION sont opérationnels ou en passe d'être finalisés, offrant de gros gains, poids/performance (facteur 4 à 5 en termes d'encombrement, masse énergie pour la même puissance), au prix d'une sécurité active prégnante.

La sécurité des batteries est primordiale, surtout dans un contexte militaire. Les batteries doivent être conçues pour minimiser les risques d'incendie, d'explosion et de fuite de substances dangereuses. Des mécanismes de protection intégrés, tels que des circuits de protection contre les surcharges et les courts-circuits, sont essentiels.

L'intégration des contraintes de sécurité (systèmes de gestion thermique pour prévenir les risques de surchauffe et d'incendie) et surtout de gabarit dans le processus d'hybridation des véhicules de combat limite cependant le plein usage des capacités possibles.

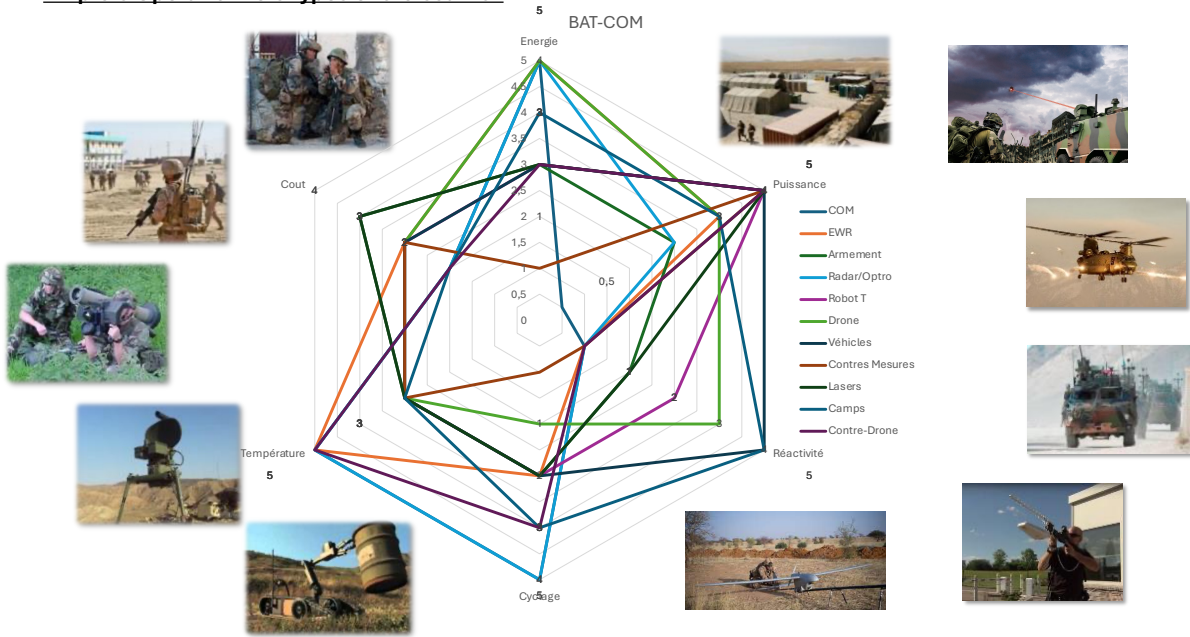
L'approche industrielle Allemande, intégrant dès la phase de conception une architecture qui prend en compte l'emploi du lithium, facilite et bonifie sur les nouveaux développements la plus-value des technologies Lithium-ion (architecture Lynx de RHEINMETTAL avec l'intégration de 8 batteries lithium embarquées autour desquelles sont implantés capteurs et systèmes de sécurité).

L'intégration de ces nouvelles solutions nécessite une évaluation rigoureuse des risques et des avantages.

### 2.2.4. Critère de choix...

Les poids respectifs des critères de choix (énergie, puissance, réactivité, cyclage, température de fonctionnement, coût) diffèrent selon les applications opérationnelles.

## Emplois Opérationnels types et croissants :



Emplois opérationnels types

Un effort de standardisation des batteries est à faire ...

### 21. Les Batteries débarquées, un usage maîtrisé des forces

- Fonctions:
  - Source d'énergie spécifique pour un système portable
  - Source d'énergie universel
- Technologies:
  - Piles: Li-MnO<sub>2</sub>, Li-SO<sub>2</sub>, Li-SoCl<sub>2</sub>
  - Rechargeables NiCd / NiMh / Li-Ion
- Problématique:
  - Maximiser l'autonomie, minimiser l'encombrement
  - Versatilité des types de batterie
  - Moyens de charge / logistique
- Contraintes:
  - Interface mécanique
  - Plage de température [-40+;+90+C]
  - Normes CEM et Environnementale
    - MIL-STD810, MIL-STD461



Bascule sur rechargeable, effort de standardisation à faire

Illustration de la nécessaire standardisation (source BrenTronics)

### 2.2.5. Et à l'étranger ? La feuille de route US ARMY définie par l'Army Lab – 2025 / 2030.

La présentation de l'approche américaine pour 2025-2030 définie dans la feuille de route de l'Army Lab a pour principal intérêt de visualiser un processus de normalisation de produits qui impactera, ne serait-ce que pour de questions d'interopérabilité, les batteries de combat françaises.

Cette approche est documentée dans le document Mil-Std 3078 du 14 novembre 2024.



La feuille de route de l'US Army (2025-2030) (source : US Army)

### 2.2.6. Synthèse

Les batteries de combat terrestres jouent un rôle crucial dans les opérations militaires modernes. Le développement et l'intégration de nouvelles technologies, comme le lithium, offrent des opportunités pour améliorer les performances et la fiabilité des batteries. Cependant, il est essentiel de trouver un équilibre entre les performances technologiques, le coût, et les exigences logistiques pour assurer le succès des opérations militaires. La souveraineté industrielle et une gestion logistique efficace sont également des éléments clés pour garantir une chaîne d'approvisionnement sécurisée et fiable.

### 2.3. Cas des piles

Les piles primaires constituent depuis plusieurs années une solution énergétique robuste pour les systèmes autonomes, en particulier dans les environnements militaires. Reposant majoritairement sur trois électrochimies lithium (Li-SOCl<sub>2</sub>, Li-MnO<sub>2</sub> et Li-SO<sub>2</sub>), elles tirent pleinement parti des propriétés du lithium métallique, matériau hautement capacitif et aujourd'hui incontournable pour répondre aux besoins industriels et de défense.

Li-SOCl <sub>2</sub>	Li-SO <sub>2</sub>	Li-MnO <sub>2</sub>
Lithium-Chlorure de Thyonile Gamme LS/LSH (3.6 V)	Lithium-Dioxyde de soufre Gamme LO/G (3.0 V)	Lithium- dioxyde de manganese Gamme LM/M (3.0 V)
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Cathode liquide</li> <li><input type="checkbox"/> Tension opérationnelle 3.6 V</li> <li><input type="checkbox"/> Construction bobine ou spirale</li> <li><input type="checkbox"/> T° -60°C / +150°C</li> <li><input type="checkbox"/> Système à pression ambiante</li> <li><input type="checkbox"/> Pas de matériau inflammable</li> <li><input type="checkbox"/> La plus grande capacité embarquée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Cathode liquide</li> <li><input type="checkbox"/> Tension opérationnelle 3 V</li> <li><input type="checkbox"/> Construction spirale</li> <li><input type="checkbox"/> T° -60°C / +70°C</li> <li><input type="checkbox"/> Pulse au-delà de 1A</li> <li><input type="checkbox"/> Performance à basse T°</li> <li><input type="checkbox"/> Système sous pression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Cathode solide</li> <li><input type="checkbox"/> Tension opérationnelle 3 V</li> <li><input type="checkbox"/> Construction spirale</li> <li><input type="checkbox"/> T° -40°C / +85°C</li> <li><input type="checkbox"/> Pulse au-delà de 1A</li> <li><input type="checkbox"/> Système à pression ambiante</li> </ul>

Couple électrochimiques primaires (source : SAFT)

Conçues intrinsèquement pour des environnements exigeants, les piles primaires offrent une fiabilité élevée et une capacité de fonctionnement sur de très larges plages de températures, tout en proposant une grande diversité de formats standardisés facilement intégrables en packs batteries. Leur simplicité d'emploi, leur très faible autodécharge et l'absence totale de maintenance ou d'infrastructure de charge constituent des avantages déterminants, pour les opérateurs. Ces technologies se distinguent également par leur haut niveau de sécurité intrinsèque. Contrairement aux accumulateurs Li-ion, les piles primaires utilisent des électrolytes non

inflammables et intègrent des dispositifs de sécurité mécanique efficaces, validés par des essais normatifs sévères tels que le TRAP test.

### 2.3.1. Haute Intensité et cas d'emploi :

Dans les contextes de haute intensité, où les infrastructures énergétiques sont dégradées ou indisponibles, les piles primaires apportent une ressource immédiatement disponible et à très forte densité énergétique. Face à l'augmentation rapide des besoins énergétiques du combattant, elles permettent de garantir l'autonomie opérationnelle tout en limitant significativement la masse embarquée.

Dans les contextes de conflits asymétriques comme symétriques, l'énergie est devenue un enjeu opérationnel majeur. L'interconnexion croissante du champ de bataille et l'augmentation des équipements individuels ont entraîné une explosion des besoins énergétiques du combattant. Alors qu'une mission de 72 heures nécessitait historiquement entre 300 et 350 Wh par soldat sur la période 2010-2020, les projections à l'horizon 2030 font état de besoins compris entre 1 500 et 2 000 Wh pour une durée équivalente.

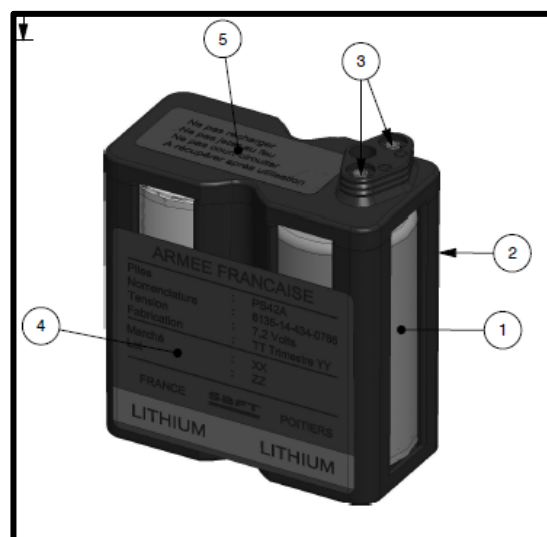
Pour répondre à cette augmentation significative tout en préservant la mobilité et l'endurance des forces, les solutions énergétiques doivent présenter une très forte densité énergétique. À titre d'exemple, les électrochimies primaires, avec des densités de l'ordre de 600 à 700 Wh/kg, permettent de couvrir ces besoins avec environ 3 kg de batteries, contre plus de 10 kg pour des solutions rechargeables limitées à 200-250 Wh/kg.

Les usages actuels des armées privilégient encore, en opérations extérieures, la mise à disposition rapide et immédiate de l'énergie au plus près des combattants, reposant principalement sur les batteries primaires.

### 2.3.2. Capacité industrielle

Sur le plan industriel, ces technologies sont fabriquées sur le territoire français, garantissant ainsi une souveraineté industrielle forte et une capacité de réponse au plus près des besoins opérationnels. Les différents sites de production de SAFT France (Poitiers, Nersac et Bordeaux) peuvent, le cas échéant, être mobilisés au service de l'autorité publique.

La fabrication des cellules primaires et leur assemblage en packs batteries destinés aux environnements militaires offrent une flexibilité industrielle spécifique, distincte de celle des technologies rechargeables. En effet, les batteries primaires ne nécessitent ni électronique embarquée (« intelligence ») ni dispositifs de sécurité additionnels. Leur fiabilité repose sur une conception intrinsèquement sûre, permettant de proposer des solutions robustes avec des coûts d'acquisition particulièrement maîtrisés.



Exemple Batterie primaire (source : Saft)

Par ailleurs, ces batteries ne sont pas soumises aux contraintes de compatibilité électromagnétique (CEM). Cette caractéristique renforce leur résilience face aux enjeux croissants de cybersécurité, en limitant les risques d'exploitation de la batterie comme vecteur de défaillance au sein des équipements qu'elle alimente.

### 2.3.3. Synthèse

Les piles primaires constituent aujourd'hui une solution énergétique essentielle pour les systèmes autonomes en environnement militaire. Grâce aux électrochimies lithium dominantes (Li-SOCl<sub>2</sub>, Li-MnO<sub>2</sub>, Li-SO<sub>2</sub>), elles offrent une densité énergétique élevée, une fiabilité exceptionnelle et une capacité de fonctionnement dans des conditions extrêmes de température, répondant ainsi pleinement aux contraintes opérationnelles des forces armées.

Leur simplicité d'emploi, leur longue durée de stockage sans maintenance, l'absence d'infrastructure de charge et leur haut niveau de sécurité intrinsèque en font une ressource immédiatement disponible, particulièrement adaptée aux opérations extérieures et aux scénarios de haute intensité, où la logistique énergétique est critique. Sur le plan industriel et stratégique, la fabrication de ces technologies sur le territoire national assure une souveraineté énergétique et technologique majeure, tout en offrant une grande flexibilité industrielle et des coûts d'acquisition maîtrisés. Leur conception intrinsèquement sûre, exempte d'électronique complexe et de contraintes CEM, renforce également leur résilience face aux risques cyber.

Ainsi, les piles primaires s'imposent comme une solution robuste, souveraine et économiquement pertinente, complémentaire des batteries rechargeables, et pleinement alignée avec les exigences opérationnelles actuelles et futures des forces armées.

## 3. Roadmap « civile » 2030+

### 3.1. La naissance d'un marché européen de la batterie

L'Europe, dans le cadre du *European Green Deal*, a impulsé le déploiement d'un écosystème des batteries avec le lancement en 2019 et 2021 de 2 IPCEI (6Md€ d'aides publiques en tout), destinés à soutenir l'émergence du tissu industriel permettant de couvrir toute la chaîne de valeur de la batterie, de la formulation des matériaux de base pour les cellules à la réalisation de modules et de packs batterie jusqu'au recyclage. Au lancement de cette initiative, c'est en premier lieu les besoins de la mobilité routière qui étaient visés, avec en appui en parallèle le vote en 2022 sur l'interdiction de la vente de véhicules à moteurs thermiques en 2030.

Ce sont plus de 30 projets de gigafactories qui ont été lancés, avec un plan de production estimé à 400 GWh en 2025 et 600 GWh en 2030, alimentant respectivement la production de 8 millions puis 12 millions de véhicules électriques.

Avec à peine 3 millions de véhicules 100% électriques vendus en Europe en 2025, on ne peut que constater que le compte n'y est pas. La production de batterie sur le seul européen reste elle aussi très en-deçà des estimations initiales, à moins de 200 GWh à la fois du fait de la faiblesse du marché de l'automobile mais aussi par la difficulté des nouveaux acteurs à réaliser le *ramp-up* de leur production. 2025 a vu l'effondrement de la société Northvolt, un de ces nouveaux acteurs du secteur.

### 3.2. Les principaux acteurs de la batterie en France

Filiale du groupe TotalEnergies depuis 2016, la société SAFT s'impose comme le pionnier historique français de la batterie industrielle, avec plus d'un siècle d'expertise continue dans le domaine de l'électrochimie. Fort de trois sites industriels en France et d'un incubateur R&D basé à Bordeaux de rang mondial, le groupe conjugue un siècle d'innovation électrochimique et un leadership technologique reconnu dans les secteurs les plus exigeants.

En France, il y a 6 projets de gigafactories de batteries plus ou moins avancés :

- ACC, la première usine en France à avoir démarré, en mai 2023, symbolise toute la difficulté à laquelle fait face le secteur : comment réussir rapidement le *ramp-up* de la production de cellules (ici NMC) avec des machines asiatiques que personne ne maîtrise vraiment en Europe ? A fin 2025, ACC n'est qu'en mesure de produire environ 4000 packs batterie par mois, très loin des 20 000-25 000 prévus.
- La gigafactory chinoise AESC Envision, inaugurée au printemps 2025 a commencé cet automne à produire des cellules et batteries pour Renault, en particulier la R5. Pour elle, le *ramp-up* semble être bien plus rapide, AESC ayant une expérience de presque 20 ans sur la fabrication de batteries.
- L'usine Verkor a été inaugurée en décembre 2025 : il est trop tôt pour avoir une idée de sa capacité à produire des packs batteries (cellules NMC).
- Les 3 autres projets d'usine de batterie sur le sol français sont plus lointains :

- Le taiwanais Prologium repousse la construction de son usine de fabrications de cellules semi-solides en 2028,
- Le français Blue Solutions vise 2030 pour la fabrication en masse de ses batteries tout solide.
- Et pour finir le français Tiamat se positionne sur une chimie et une cible différente des précédents acteurs, avec sa cellule sodium-ion, plutôt destinée au marché du stationnaire. Son usine est prévue pour 2027.

### ***3.3. Quelles sont les chimies utilisées aujourd'hui ?***

Pour la mobilité : le marché est largement préempté par les chimies NMC (Nickel Manganèse Cobalt) et NCA (Nickel Cobalt Oxyde d'Aluminium) et de plus en plus par la chimie LFP (Lithium Fer Phosphate). Les chimies NMC et NCA sont les plus performantes en densité massique et volumique, points clefs pour la mobilité routière. Cependant, depuis quelques années perçue la chimie LFP (la moitié du marché de la mobilité et l'essentiel du marché stationnaire) du fait de son moindre coût et de sa meilleure sécurité, même si ses performances pures sont moindres en matière de puissance et densité d'énergie que celles du NMC et NCA.

Pour les usages stationnaires : l'avènement de la chimie LFP a été un game changer pour le secteur stationnaire du fait d'un coût toujours plus faible, une très grande durée de vie en cyclage et une meilleure sécurité. Les enjeux de densités massiques et volumiques sont en général moins critiques pour les applications stationnaires.

Pour l'électronique grand public : historiquement, les appareils électroniques sont équipés de batteries LCO (Lithium Cobalt Oxides) qui présentent une très bonne densité d'énergie volumique et massique, mais une durée de vie plutôt courte

Les différentes chimies mentionnées ci-dessus sont celles de la cathode.

Les anodes des batteries Lithium ion sont en général en graphique naturel ou synthétique, celle de la chimie sodium-ion sont en carbone dur.

### ***3.4. Éléments menants sur l'évolution des chimies actuelles***

Le fabricant de cellules souhaite amortir son outil de production. Ce qui signifie qu'il n'est pas enclin à changer pour une chimie qui impliquerait un changement de sa ligne de production

Il pousse aux actions d'évolution continue des dosages du mix de matériaux utilisés et d'amélioration des procédés de fabrication.

Le constructeur automobile attend toujours plus de performances (meilleure densité d'énergie soit pour augmenter l'autonomie, soit pour abaisser la masse du véhicule, le tout à moindre coût et pour une meilleure sécurité.

C'est un acteur qui peut être versatile, on l'a bien vu dans les stratégies des constructeurs qui ont rapidement introduit le LFP dans leurs gammes.

Le client final est encore dans l'état d'esprit à vouloir beaucoup d'autonomie par crainte de la panne. Il est moins sensible aux autres critères, mais le temps de recharge commençant à être un argument commercial chez certains constructeurs, on peut s'attendre à une plus grande sensibilité des consommateurs sur ce critère-là.

La réglementation Européenne concernant le développement d'une économie circulaire des matières, avec des directives ambitieuses sur le recyclage des matériaux critiques, pourrait orienter certains choix de chimie des constructeurs et ou des fabricants. Mais aujourd'hui, n'est pas très clairement identifié celui qui « va payer » le coût du recyclage des batteries. De plus, les batteries ont une durée de vie beaucoup plus longue qu'estimée il y a quelques années ; combiné à un marché des véhicules électriques pas aussi massif que prévu, cela repousse d'autant plus loin dans le temps l'arrivée en quantité significative de batteries sur le marché du recyclage.

### ***3.5. Feuille de route EU des batteries Li-ion***

La feuille de route européenne des chimies li-ion est essentiellement axée sur l'avènement de la batterie tout solide, vue comme un *game changer* sur le plan des performances pures (densité d'énergie, vitesse de recharge).

Les batteries « en circulation » sont de génération 2a et 2b. On commence à voir sur le marché des propositions de batterie 3a et à l'état de l'art R&D des batteries semi-solide, avec un électrolyte gélifié. C'est la génération 3b.

La batterie tout solide, de génération 4, avec un électrolyte tout solide est une rupture. Malgré de nombreuses et récurrentes annonces dans la presse, il n'existe pas aujourd'hui de cellule tout solide industrialisable, une des difficultés majeures étant la mise au point de procédés de fabrication à l'échelle industrielle. Par ailleurs, l'atout

de la batterie tout solide est aussi son point faible : capable d'embarquer plus de lithium (métal) pour une meilleure densité d'énergie massique et volumique, elle est plus onéreuse.

	GEN 3 (Li-ion)	GEN 3 (Li-ion hybride)	GEN 4 (ASSB)	Gen 5 (Li/S)
Roadmap R&D et Start-up	Accompagnement des gigafactories (en cours)	En maturation TRL 3 à 6	A l'étude TRL 3 à 5 (échéance 2028-2032)	A l'étude TRL 3 à 4 (échéance 2030-2035)
Roadmap industrielle	Début de production (stade plus ou moins avancé selon les acteurs)	2028-2030	2030-2035	>2035

Génération de batteries (roadmap R&D et industrielles) (source : CEA)

### 3.6. Quelles seront les chimies post 2030 ?

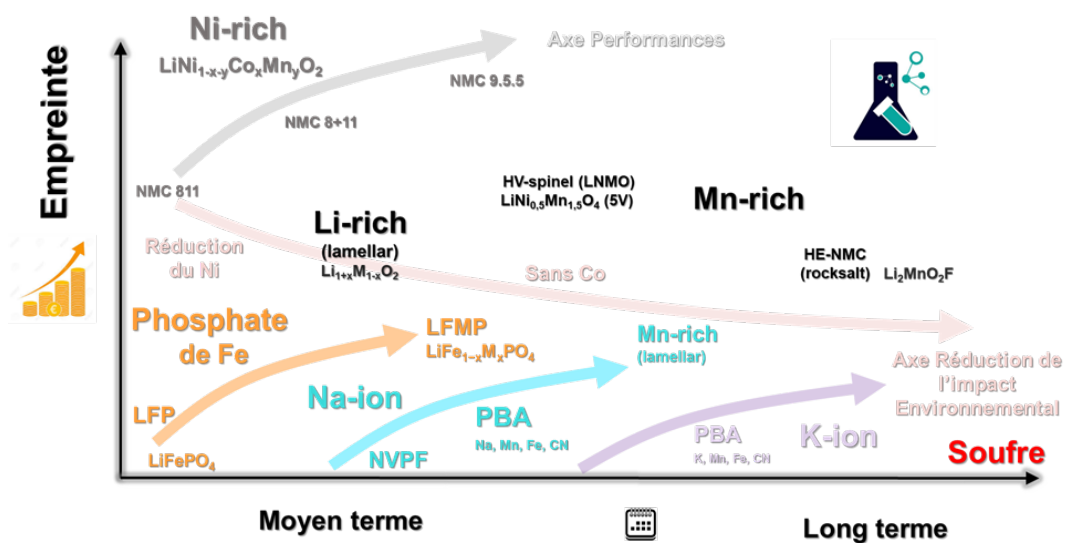
Plusieurs voies sont suivies en parallèle, répondant à des besoins et des stratégies différentes :

D'un côté, l'amélioration continue des chimies existantes NMC et LFP afin d'augmenter leurs performances (densité d'énergie, vitesse de recharge)

De l'autre, la recherche de chimies alternatives visant plusieurs objectifs :

- Limiter le recours voire se passer des métaux géostratégiques,
- Baisser le coût des batteries,
- Baisser l'empreinte carbone de la fabrication de la batterie,
- Améliorer la sécurité des batteries

Le graphe suivant illustre les différentes voies de progrès (au niveau de la cathode) selon les chimies



Roadmap des principales chimies en cours d'étude (source : CEA)

### 3.7. Quelle R&D menée à l'échelle nationale ?

Dans le cadre du plan de relance France 2030 a été lancé en 2023 le Programme et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) pour les batteries<sup>4</sup>. Ce PEPR (il en existe sur d'autres thématiques) est co-piloté par le CEA et le CNRS. Doté de 45M€ sur 7 ans, il a pour mission le développement de nouvelles générations de batteries plus performantes, plus sûres, à moindre coût et à durée de vie plus longue que celles commercialisées actuellement.

<sup>4</sup> <https://www.pepr-batteries.fr/>

Le programme traite en particulier de nouvelles chimies de batteries, de systèmes de gestion de batteries (BMS), et d'outils numériques avancés pour la caractérisation des matériaux et la simulation des composants.

Parmi les 19 projets en cours, on peut citer :

- Le projet LIMASSE sur le développement de prototypes fiables de batteries tout solides avec une anode en lithium-métal ;
- Le projet FRISBI sur le développement d'une batterie tout solide à ions fluorure comme alternative tout solide au Li-ion ;
- Le projet HIPOHYBAT sur le développement de batteries Sodium-ion de forte puissance (>150 Wh/kg) avec une capacité de recharge inférieure à 5 minutes, comme alternative au Plomb-acide et Lithium-ion ;
- Le projet SIMBA de microbatterie Sodium-ion flexible pour être implantable sous la peau et entièrement biorésorbable.

### **3.7.1. Quelle R&D post-PEPR ?**

Entre le début du programme PEPR et aujourd'hui, le monde (de la batterie, mais pas que) a beaucoup changé. La thématique de la souveraineté ou du moins du risque de dépendance est devenu un sujet majeur pour ne pas dire prioritaire dans certains secteurs. La R&D sur les batteries doit apporter des solutions en ce sens.

Les projets de R&D portés initialement par l'idée d'obtenir des cellules moins coûteuses, ayant une plus faible empreinte écologique répondent indirectement à cet objectif de non dépendance : en se focalisant sur les chimies basées sur des matériaux plus abondants (sur notre territoire ou largement répartis sur les différents continents), on baisse le coût de la matière première, on réduit considérablement l'empreinte carbone de la fabrication des cellules et la dépendance à un pays tiers ; au prix d'une baisse sensible des performances pures (moindre densité d'énergie massique et volumique) mais en contrepartie une meilleure sécurité.

Les nouvelles chimies telles que Sodium-ion et Potassium-ion pourraient respectivement à moyen et long terme être une réponse à cette volonté d'indépendance. La R&D Sodium-ion est déjà suffisamment mature et pourrait être transférée dès aujourd'hui à l'industrie.

L'autre levier est le recyclage, avec l'idée de « séquestrer » sur le sol européen les matières premières importées pour les réutiliser en fin de vie de la batterie pour fabriquer de nouvelles batteries (on parle de boucle de recyclage fermée) ou d'autres applications (boucle ouverte).

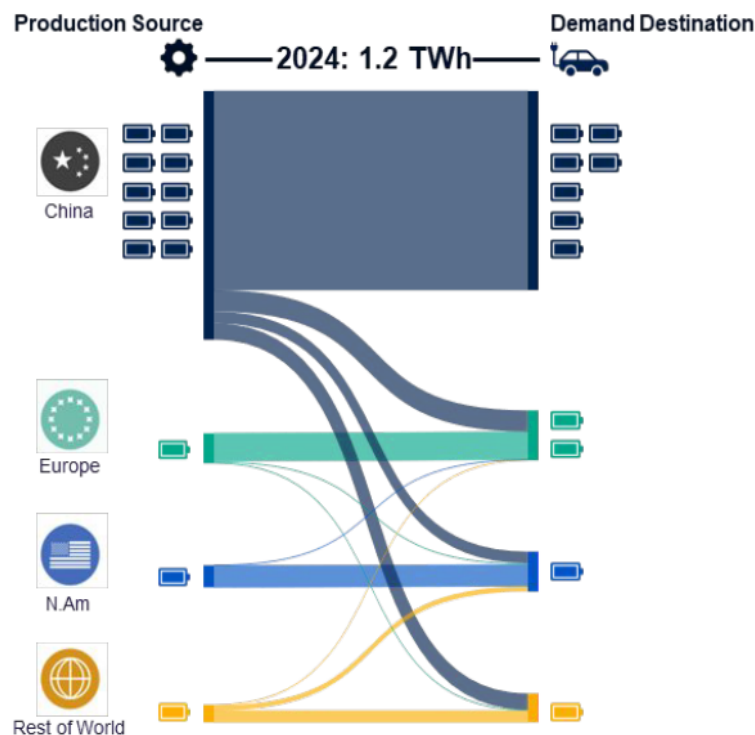
Ce levier ne peut être une réponse immédiate au problème de souveraineté ; il s'inscrit forcément sur le long terme, la durée de vie des batteries NMC et LFP des véhicules électriques étant bien plus longue qu'initialement estimée. Aujourd'hui l'industrie du recyclage retarde sa mise en route, faute d'accès à des batteries en fin de vie et en volume suffisant. Cela laisse le temps aux acteurs de la R&D de progresser à la fois sur les procédés de recyclage (augmenter l'efficacité de la récupération des matériaux tout en baissant son coût) et sur l'augmentation du taux de ces métaux recyclés pouvant être incorporés dans de nouvelles cellules sans (trop) dégrader les performances et sans compromis sur la sécurité.

### **3.8. Ailleurs dans le monde**

La **Chine** est le leader incontesté de la batterie, à la fois sur le plan de la R&D&I (détenteur de plus de 50% des brevets sur les batteries), mais aussi et surtout sur le plan industriel (85% des capacités mondiales de production) avec ses 2 mastodontes CATL et BYD.

Le chinois CATL a progressé de 34,5 % (400,0 GWh) par rapport à l'année précédente, conservant solidement sa place de numéro un mondial avec 38,2 % de part de marché. Les principaux constructeurs automobiles chinois adoptent massivement les batteries CATL, tandis que des constructeurs mondiaux tels que Tesla, BMW, Mercedes-Benz et Volkswagen les intègrent également. BYD a enregistré une croissance de 31,3 % (175,2 GWh), se classant 2<sup>e</sup> mondial avec 18,7 % de part de marché. BYD étend sa présence non seulement sur le marché intérieur chinois, mais aussi à l'international, avec une expansion particulièrement marquée en Europe. L'utilisation des batteries BYD en Europe a atteint 12,7 GWh cette année, soit une augmentation de 206,6 % sur un an.

La Chine est à la fois le premier fabricant consommateur de batterie mais aussi le premier fournisseur des autres régions du monde entier.



Production / Demande de batteries (Source : CRU Group <https://www.crugroup.com>)

Pour asseoir sa domination, la Chine a développé sa stratégie au tournant des années 2000 à travers son 10ème plan quinquennal, l'idée étant à l'époque de sauter l'étape du moteur thermique, apanage des occidentaux difficilement rattrapable, pour passer directement à l'électrique. En une quinzaine d'année, la Chine a développé l'ensemble de la filière de la batterie, de l'extraction-raffinage jusqu'au système batterie.

Sa stratégie s'appuie aujourd'hui sur plusieurs volets :

- Le volet scientifique : la Chine reste à ce jour en avance sur la R&D des batteries ; A noter que 40% des brevets déposés en 2024 concerne des chimies nouvelles.
- Le volet réglementaire : la nouvelle réglementation chinoise sur la sécurité des batteries embarquées dans les véhicules, présentée en 2025 et devant être mise en œuvre en juillet 2026, va forcer les autres pays à s'aligner. Cette réglementation interdit quasiment tout emballage de cellule. Cela va favoriser nettement l'essor des cellules LFP (et on peut imaginer aussi le Na-ion) par rapport aux cellules NMC qui sont par nature plus sensibles à cette problématique d'emballage. C'est un coup dur pour l'Europe et les Etats-Unis qui avaient misés sur le NMC (car plus performantes) versus la Chine qui a misé sur le LFP (moins couteuse).
- Le volet politique avec la mise en place d'un contrôle des exportations plus ou moins poussé, selon le niveau de tension diplomatique entre la Chine et les grands blocs occidentaux (Europe, Etats-Unis). La Chine a déjà freiné plusieurs fois les exportations de métaux raffinés. C'est une arme de rétorsion très efficace car ça a un coût économique assez rapide (ça met des industries à l'arrêt) voire une menace pour la souveraineté d'un pays (quand par exemple les terres rares chinoises constituent la base d'aimants équipant des moyens militaires critiques)
- Le volet « monopole du raffinage » : même si elle n'a pas toutes les matières premières sur son territoire, la Chine s'est largement équipée pour être souveraine sur le raffinage de ces matières et s'en servir à des fins économiques et/ou politiques cf point précédent et §6.

Les **Etats-Unis** se sont relancés en quelques années avec une croissance significative des capacités de production grâce aux aides de l'IRA<sup>5</sup> mises en place sous l'administration Biden. Cette politique pro énergies décarbonées n'est cependant pas directement soutenue par l'administration Trump, mais indirectement du fait de la menace des droits de douanes qui pousse les fabricants étrangers (les Sud-coréens LGES et Samsung ou les Japonais Panasonic en particulier) à s'installer sur le territoire américain plutôt qu'exporter leur production.

<sup>5</sup> L'IRA ([Inflation Reduction Act of 2022](#)) est une loi américaine sur la réduction de l'inflation promulguée le 16 août 2022. L'IRA mobilise sur dix ans 369 milliards de dollars pour soutenir l'industrie verte.

L'évolution du positionnement des Etats-Unis sur les batteries est difficilement prédictible à court terme, tiraillée entre une politique anti ENR au sens large appuyée par un arrêt des aides fédérales et un réalisme économique des industries et de certains Etats de plus en plus consommateurs d'ENR et (donc) de batteries. Les constructeurs automobiles marquent toutefois un recul dans l'électrification de leur gamme en se repositionnant sur la sortie de véhicules à moteurs thermiques.

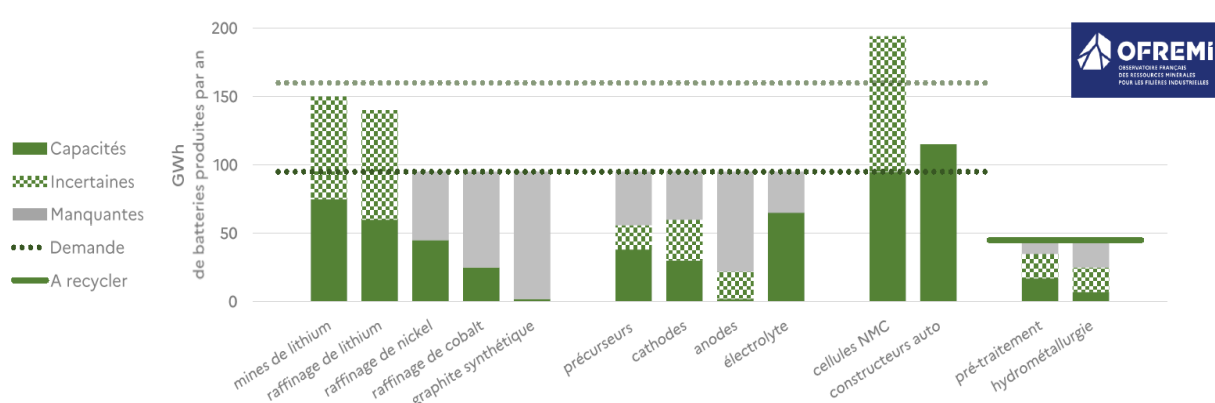
A noter que sur le plan de la R&D&I, les Etats-Unis sont le deuxième détenteur de brevets sur les batteries (27%), en particulier sur les nouvelles chimies.

## 4. Les matières premières

Les éléments présentés ci-après proviennent de travaux réalisés par le CEA dans le cadre de l'OFREMi – Observatoire Français des Ressources Minérales pour les Filières Industrielles. L'OFREMi rassemble les compétences des principaux acteurs français sur l'analyse des chaînes de valeur des métaux stratégiques. Il est animé par le BRGM et associe les compétences du CEA, de l'IFPEN, de l'ADEME, de l'IFRI et du CNAM.

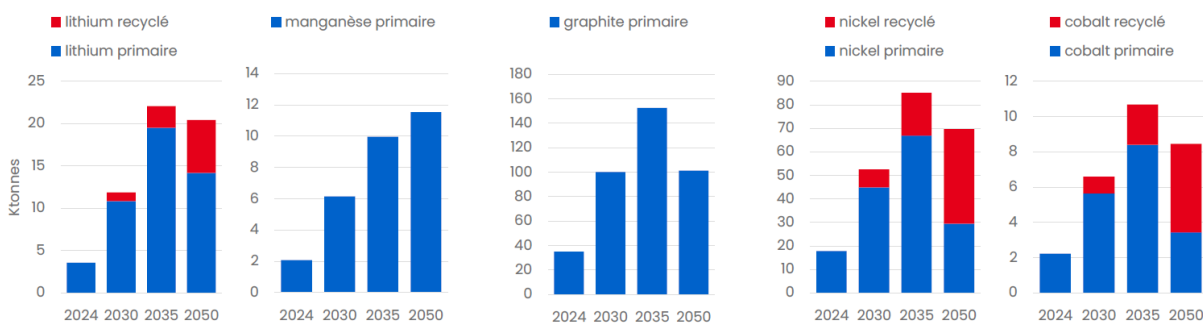
### 4.1. État des lieux des besoins et des capacités industrielles françaises

La filière industrielle française de la batterie est naissante. Impulsée notamment par 2 IPCEI, elle est globalement en cours de déploiement, mais dans le détail, présente des faiblesses notoires par rapport aux projections de la demande en 2030 et 2035. La figure suivante présente une évaluation des capacités françaises de production à l'horizon 2030 à chaque étape de la chaîne de valeur de la batterie. On peut observer un net déficit de capacité sur l'amont de la chaîne dès 2030.



Capacités de production française en 2030 mises en regard de la demande de batteries en 2030 (pointillés vert foncé) et en 2035 (pointillés vert clair) (source : OFREMi)

Les besoins chiffrés de matières pour fabriquer les batteries dont a besoin annuellement le secteur de la mobilité française est présenté dans le graphe suivant. Il prend en compte les pertes (rebut) et évalue la matière recyclée qui pourrait compléter l'apport en matière primaire.



Besoins chiffrés de matières (source : OFREMi)

En 2050, c'est 30% du Lithium qui pourrait venir du recyclage ainsi que 60% du nickel et cobalt.

#### 4.2. Disponibilité des matières

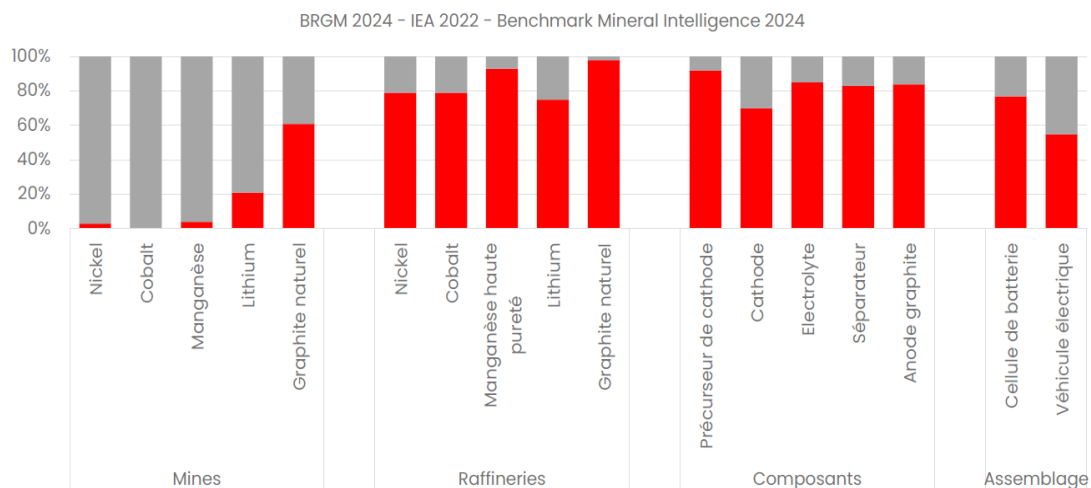
Les réserves<sup>6</sup> à l'échelle mondiale de Lithium, Nickel et Cobalt - pour ne prendre que ces métaux - sont aujourd'hui insuffisantes face aux besoins estimés à partir de 2040.

Ces réserves peuvent cependant augmenter si le prix des métaux augmente ou si le coût des technologies d'exploitation diminue. Il faut cependant garder en tête qu'ouvrir une mine prend entre 7 et 20 ans.

Au-delà de la problématique des réserves, les limitations sont aussi au niveau des capacités de raffinage.

Enfin ultime point critique dans l'accès aux matières, c'est le monopole, hérité ou acquis, de certains pays et l'usage de ces matières (brutes et raffinées) comme arme géopolitique.

L'exemple le plus frappant est celui de la Chine qui a construit sur les deux dernières décennies tout un monopole sur les métaux de la transition énergétique, soit du fait de ressources localisées sur son territoire, soit en s'étant dotée de capacités de raffinage compétitives et à l'échelle des besoins mondiaux ; ce qui en fait un acteur quasi incontournable sur la filière batterie (cf figure ci-après).



Monopole chinois (en rouge) sur les étapes d'obtention des batteries (source : BRGM)

Depuis 2023, la Chine a mis en place des mesures successives de restriction aux exportations de métaux critiques créant des tensions sur les approvisionnements et sur les prix. Sont notamment touchés le graphite, les matériaux composant les cellules LFP et LMFP et plus récemment (octobre 2025) l'ensemble des matériaux de batterie (LFP, NMC, NCA, Li-Rich) mais aussi les équipements pour la fabrication.

Face au risque - avéré - de forte dépendance, des stratégies doivent être mises en œuvre pour contourner ou atténuer les risques dont :

- La substitution partielle ou totale
- L'allongement de la durée de vie des batteries, le réemploi puis en dernier ressort le recyclage
- La constitution de stocks stratégiques
- La sobriété, les changements d'usage

<sup>6</sup> Réserves : la part des ressources économiquement exploitables à un instant donné

## 5. Vision de l'armée de Terre

### 5.1. L'énergie électrique : facteur déterminant de la supériorité opérationnelle

L'invasion de l'Ukraine par la Russie et ses conséquences sur les approvisionnements ont amplifié la prise de conscience de la dépendance des armées modernes aux énergies fossiles, une dépendance de plus en plus perçue comme un talon d'Achille opérationnel. Efficacité énergétique des infrastructures, électrification des équipements militaires, conversion aux énergies renouvelables, développement de *small modular reactor*, déploiement de systèmes de management de l'énergie de type *microgrids* et *smartgrids*, associés aux capacités de stockage : les notions de « résilience énergétique » et de « transition énergétique » figurent dans les feuilles de route technologique de nombreuses forces armées, notamment les Etats-Unis et la France.

Comme l'affirmait la stratégie énergétique de défense française datant de 2020, l'énergie deviendra un élément encore plus central de la capacité de combat terrestre d'ici à 2030. Il est clair que l'énergie est devenue l'un des facteurs déterminants de notre supériorité opérationnelle.

Un premier levier d'action de l'armée de Terre dans le domaine de l'énergie sur le champ de bataille se trouve naturellement dans la maîtrise de la consommation énergétique. Il reste limité car il ne doit pas réduire la capacité opérationnelle !

Le second levier se situe dans le tryptique « mieux produire, mieux gérer, mieux distribuer » l'énergie, et il reste un des défis technico-opérationnels pour équiper un corps d'armée en 2030.

S'agissant de la problématique des batteries de combat, deux points d'application sont illustratifs : les groupes électrogènes de forte puissance ; les batteries électriques mobiles (combattants) ou transportables (véhicules).

Ce rapport s'intéresse aux sources d'énergie électriques, batteries mais aussi piles, destinés à des systèmes mobiles. Une première esquisse de l'ensemble des utilisations de l'énergie sur le champ de bataille a été réalisée par l'ETO Enerbat, qui rendra ses conclusions fin 2026. De futures études et réflexions bâtiront dessus, y compris sur la place accordée aux piles et batteries.

### 5.2. Les deux principaux composants : groupes électrogènes et batteries

#### 5.2.1. Groupes électrogènes de forte puissance

Les groupes électrogènes de forte puissance constituent des capacités essentielles pour permettre à une force interarmées de conserver sa liberté de manœuvre en entrée de théâtre.

Dans le cadre de la production de grande puissance afin d'alimenter des camps, des PC, etc., l'armée française modernise ses groupes électrogènes actuels pour prolonger leur durée de vie et répondre à ses besoins énergétiques croissants. Actuellement, les groupes électrogènes les plus importants (45 kW, 80 kW et 400 kW) alimentent les unités, mais leur âge moyen de 30 ans nécessite un retrofit et un renouvellement avec une capacité intermédiaire visant avant 2030 l'acquisition de groupes à vitesse variable, des packs batteries et des automates capables de piloter plusieurs sources d'énergies de puissance et d'origine différentes. Au-delà, le projet ARPEGE (Appareil répartiteur de production électrique et de gestion d'énergie.) visera l'emploi de technologies plus matures et de réseaux intelligents. De nombreux autres groupes électrogènes de capacité plus réduite équipent aujourd'hui les forces armées, avec tout autant d'enjeux en matière de miniaturisation, de polyvalence, de rusticité et de performances.

#### 5.2.2. La batterie électrique du combattant et de son véhicule

##### La batterie du combattant

Une bonne batterie pour combattant, portable (sur l'homme) voire portable (transportable sur de courtes distances), doit être :

- Légère et peu encombrante – parce que le fardeau logistique est un facteur dimensionnant lorsqu'il est porté à dos d'homme.
- Fiable dans le temps et les conditions extrêmes – froid sibérien, désert africain ou jungle humide, elles doivent fonctionner.
- De haute densité énergétique – pour durer plus longtemps sans augmenter le poids.
- Modulable, interopérable et standardisée – pour alimenter différents appareils selon les besoins et ne pas avoir une panoplie de batteries et de chargeurs associés.

- Communicante – connaître son état de charge, le nombre de cycle déjà effectués, etc.
- Sécurisée – pas de surchauffe, pas d'explosion intempestive.

Bref, la batterie idéale est un équilibre presque philosophique entre puissance, durabilité et légèreté.

A noter également une certaine discrétion sonore ou visuelle (évacuation des fumées) par rapport aux groupes thermiques. Ce qui n'empêche pas qu'une batterie chauffe donc peut être décelable en vision thermique, mais il existe des moyens de se camoufler.

### **Les batteries pour véhicules militaires**

Les véhicules modernes, qu'ils soient blindés ou légers, ne sont plus de simples moyens de locomotion. Ils intègrent :

- Une électronique embarquée (la vétronique) ;
- Des systèmes de détection et de surveillance ;
- Des capteurs de différentes natures ;
- Des effecteurs allant de l'arme de bord sur un tourelleau télé-opéré aux communications tactiques voire opératives ;

Sans batterie performante, ces fonctions s'effondrent comme un château de cartes... sauf que là, ce n'est pas une carte qui tombe — c'est potentiellement une mission.

Les batteries de véhicules doivent être :

- Robustes contre les vibrations et chocs ;
- Capables de fournir une puissance instantanée élevée (au démarrage et pour les systèmes critiques) ;
- Adaptées aux environnements extrêmes ;
- Faciles à remplacer ou à recharger en opération ;
- Intégrables avec des systèmes hybrides (diesel + électrique).

Ces exigences sont indispensables : elles répondent à des besoins tactiques réels et immédiats.

## **5.3. Situation actuelle**

### **5.3.1. Dans l'armée de Terre**

Deux technologies dominent dans les forces :

- La technologie « plomb » est maîtrisée et sûre, mais pâtit d'une faible densité énergétique. Elle est réservée à des usages où le poids n'est pas un facteur déterminant (démarrage de véhicules, sous-marins, alimentation de secours sur navires, etc.).
- La technologie « lithium-ion » est plus récente, datant de la fin du XXe siècle. Sa densité énergétique dix fois supérieure à la précédente l'impose comme référence pour les équipements portables (électronique du quotidien) ou nécessitant une grande autonomie (véhicules électriques). Mais elles présentent toutefois un inconvénient majeur, leur sécurité. Leur risque d'emballement thermique et de combustion nécessite des dispositions contraignantes pour les armées, notamment en environnement confiné (intérieur des véhicules).

**Les nouvelles chimies amenées à monter en puissance d'ici à 2040 ne devraient pas provoquer de ruptures technologiques majeures**, mais compléteront l'offre, tant dans le domaine de la mobilité que dans celui du stationnaire. La batterie à électrolyte solide (dite « tout solide ») pourrait néanmoins permettre d'obtenir des performances énergétiques trois fois supérieures au lithium-ion, voire de supprimer le risque d'emballement thermique. D'autres chimies compléteront également l'offre (liste non exhaustive) : sodium-ion, nickel-zinc pour les applications stationnaires, en remplacement des batteries au plomb, ou lithium-soufre pour le spatial.

A noter qu'aujourd'hui la DGA impose aux batteries équipant les armées de répondre aux normes civiles pour le transport aérien. Pour l'armée de Terre, le risque d'emballement thermique et de combustion nécessite des dispositions contraignantes pour les armées, notamment en environnement confiné (intérieur des véhicules terrestres, bâtiments de la Marine nationale, aéronefs, etc.).

Une réflexion globale sur l'emploi des batteries dans les armées françaises est en cours. Les batteries sont déjà massivement présentes dans les forces, mais aucun standard européen ou français n'est défini à ce jour. Chaque programme, système ou fabricant utilise la technologie et le modèle qui correspond à son besoin. L'OTAN ne possède, quant à elle, que le standard 6T (déclinée en technologies « plomb » et « lithium-ion »), utilisé notamment pour le démarrage de véhicules terrestres.

L'équipement du fantassin illustre d'ailleurs parfaitement le besoin de cohérence. En opération, vingt modèles différents de batteries lithium-ion doivent être fournis, rechargés, remplacés (Félin, Contact, PR4G, GPS, jumelles, etc.). Les chargeurs et les connectiques sont variés. Un « chargeur universel de batteries » a fait l'objet d'une évaluation tactique en 2022, mais même équipé de dix adaptateurs, il ne permettait pas de tout recharger. À noter que la dotation progressive en drones ne fera qu'aggraver cet état de fait.

Le sujet des batteries s'inscrit dans un contexte plus large d'électrification croissante du champ de bataille. Les armées chinoises et américaines expérimentent ou prévoient d'expérimenter des blindés hybrides, alors que les retours du conflit russo-ukrainien démontrent l'utilisation accrue de l'électricité sur le front. En France, la question de l'hybridation se pose pour certains véhicules (expérimentation GRIFFON/SERVAL en cours).

### **5.3.2. A l'étranger**

Pour bien comprendre l'enjeu, il est bon de jeter un œil sur ce que font les autres puissances. Aux États-Unis, l'accent est mis sur la création de batteries plus légères, plus puissantes et intégrées directement à l'équipement des soldats, avec des technologies Lithium-ion avancées et des sources alternatives d'énergie (solaire, *fuel cells*) au sein de *micro* et *smart grids*.

La Chine, de son côté, a mis en place des contrôles à l'exportation sur les technologies avancées de batteries lithium-ion pour préserver sa propre industrie et limiter l'accès à certaines technologies sensibles à l'étranger. La politique chinoise de fusion militaro-civile fait en sorte que technologies civiles de batteries soient intégrées rapidement dans les applications militaires.

En Europe, le Royaume-Uni est l'un des pays qui pilote des programmes de sources d'énergie portables avancées, légères et robustes pour ses soldats, notamment des solutions à base de *fuel cells* portatives et des systèmes de stockage d'énergie plus denses que les batteries classiques.

L'industrie allemande de défense, soutenue par une base industrielle forte en technologies électrochimiques, se concentre sur batteries légères et haut rendement énergétique, optimisées pour usage tactique terrestre et conditions climatiques difficiles.

Que conclure de ces efforts internationaux ? Simplement ceci : nos alliés et nos compétiteurs considèrent l'énergie comme un élément stratégique, pas comme un accessoire. Ce n'est pas juste une mode technologique — c'est une révolution dans la manière de penser la supériorité. Nous ne pouvons pas rester spectateurs.

## **5.4. Attentes et conclusion**

### **5.4.1. Les attentes de l'armée de Terre.**

Pour que l'armée française reste une armée moderne, réactive et décisive, elle a besoin :

- D'innovation : des technologies qui poussent les limites actuelles de la densité énergétique, de la durabilité et de la sécurité.
- De modularité : que ce soit pour un soldat ou un char, ou tout du moins, sans faire le grand écart, pour recharger un drone, un robot, un GPS, la batterie doit le permettre sans grande adaptation.
- De coopération étroite entre industrie et armée : nous ne demandons pas juste des batteries, mais des partenaires qui comprennent les contraintes opérationnelles et qui travaillent avec les militaires pour anticiper les besoins futurs.
- De standardisation : pour réduire les coûts, faciliter les opérations conjointes et renforcer l'autonomie stratégique.

Dans son approche transverse du sujet « batterie », l'armée de Terre vise plusieurs objectifs.

L'ambition est de faire basculer le ministère d'une approche considérant les batteries comme un sous-système de l'équipement qu'elles alimentent, à une approche les considérant comme un système à part entière, avec des spécifications à intégrer aux cahiers des charges des différents programmes.

Plus largement, des échanges sont en cours sur des sujets comme la standardisation (chargeur, connectique, système de management de la batterie, dimensions), les normes de sécurité (en fonctionnement, en charge dans des véhicules et durant le stockage ou le transport), le maintien en condition opérationnelle ou la logistique.

À terme, l'objectif serait de créer une gamme de batteries standardisées et un guide technique des batteries à l'instar de celui existant pour les produits pétroliers distribués par le Service de l'énergie opérationnelle (SEO). Chaque modèle disposerait d'une spécification, ferait l'objet d'essais d'homologation, de contrôle en recette. Ces spécifications pourraient servir de références pour les industriels souhaitant développer des batteries au profit du MINARM. Elles pourraient également être intégrées dans les cahiers des clauses techniques particulières des opérations d'armement.

En termes d'impératifs et de contraintes opérationnels, outre être capable de délivrer l'énergie nécessaire aux missions et opérations, il s'agit d'intégrer les enjeux énergétiques dans la planification et la conduite des opérations.

### 5.4.2. Synthèse

De la stratégie énergétique découle les objectifs opérationnels, des plus généraux aux plus spécifiques.

Il convient de ne pas perdre de vue la finalité opérationnelle : opérer en tout temps en tout lieu, = conserver / augmenter la liberté d'action, c'est à dire développer un système de logistique énergétique simplifié et compatible aux déploiements à travers le monde.

Pour se faire, l'avenir doit être anticipé au mieux, d'abord par une réflexion prospective (contexte d'engagement aéroterrestre), ensuite par l'écriture de concepts capacitaires qui éclairent sur la direction à suivre, enfin par des études, de la recherche et des expérimentations qui permettent d'aboutir in fine sur le plan technologique : rester en veille, tirer profit des avancées technologiques du civil, investir dans leur maturation pour un emploi militaire.

La maîtrise énergétique s'inscrit dans le cadre de la politique énergétique des forces qui consiste à "consommer moins ; consommer mieux ; consommer plus sûr".

A l'horizon 2040, les pistes concernent le maillage énergétique du champ de bataille (producteurs – vecteurs – consommateurs) visant à standardiser, mutualiser, rationaliser les sources d'énergie.

L'énergie, et donc les batteries, jouent un rôle essentiel et grandissant dans la supériorité opérationnelle comme dans la résilience des forces armées. Elle s'impose comme condition essentielle pour gagner la guerre aujourd'hui et encore plus demain. Écrire un concept capacitaire sera la preuve que l'énergie est bien rentrée dans le capacitaire et sera suivi d'un "vrai" programme "énergie".



*Vision futuriste (et humoristique) de la bat-mobile de l'armée de Terre*

## 6. Intégration dans des systèmes

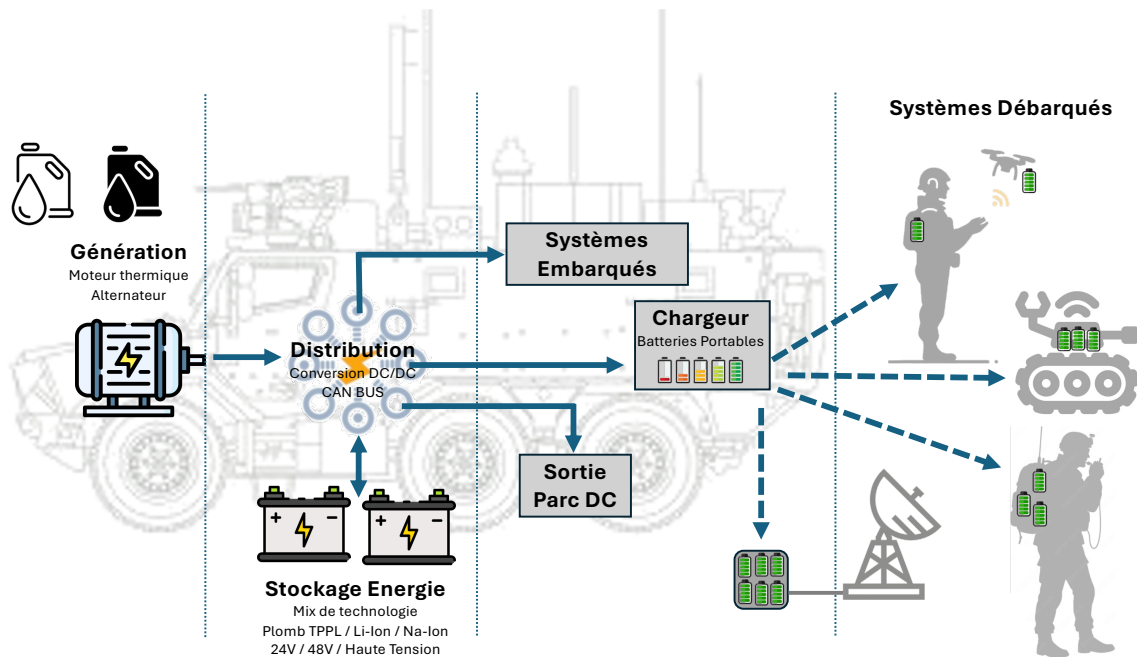
Le GT s'est intéressé aussi à l'intégration des batteries dans trois types de systèmes d'armes spécifiques.

Les véhicules de combat intègrent notamment des batteries liées à leur propre mobilité, notamment dans le cas de véhicules hybrides. Ils sont aussi les véhicules accueillant les combattants tels FELIN (non spécifiquement traité ici), combattants qui sont en eux-mêmes des plateformes de systèmes électroniques ambulantes, le véhicule étant donc lui-même un hub énergétique répondant aux besoins de ces combattants.

Les missiles doivent disposer de batteries capables d'être stockées durant des dizaines d'années en toute sécurité et, au moment de l'utilisation du missile, de délivrer en un temps court une quantité d'énergie importante.

Les *Energy Storage Systems* (ESS) qui permettent de stocker l'énergie pour une utilisation ultérieure, jouant un rôle clé dans l'équilibre entre production / consommation et dans l'intégration des énergies renouvelables.

Le cas des batteries embarquées sur les drones aériens est traité dans les travaux du Pacte drones.



Chaîne énergie opérationnelle de combat (source BrenTronics)

## 6.1. Intégration sur véhicules blindés

### 6.1.1. Vue fonctionnelle

A l'origine la batterie avait une fonction de service : démarrer le moteur thermique, dans toutes les conditions.

Ensuite, la déclinaison sur la batterie a conduit à des fonctions principales et des fonctions secondaires qui peuvent être différentes du véhicule civil :

- FP1=> Fournir un pic de puissance au démarreur du moteur
- FP2=> Fournir de l'énergie, pour atteindre une autonomie électrique en veille (moteur thermique éteint)
- FSd1=> Stabiliser le réseau électrique
- FSd2=> Pouvoir être stockée pendant plusieurs mois dans des environnements sévères

A l'usage, l'autonomie en veille est la fonction qui dimensionne le nombre de batterie embarqué dans le véhicule.

### 6.1.2. Situation actuelle

Depuis des décennies les batteries pour véhicules sont normalisées (format 6T) et utilisent des cellules au plomb. Elles ont une tension nominale de « 12V », on en met 2 en série pour alimenter le véhicule en 24V, qui est la tension requise pour les calculateurs de mobilité ainsi que les systèmes militaires.

On constate sur les véhicules une augmentation significative des consommateurs électriques, que ce soit pour le confort des occupants (climatisation) ou pour les systèmes militaires nécessaires à la mission (système de détection, brouillage, communication, arme). Par conséquent le nombre de batterie nécessaires pour tenir la veille silencieuse est en augmentation.

Certains véhicules dont la veille silencieuse est primordiale embarque des APU (*auxiliary power unit*) car il n'est pas possible d'embarquer le nombre de batterie suffisant. Ces systèmes dégradent la furtivité (acoustique et thermique) du véhicule et imposent des contraintes d'intégration fortes (alimentation en carburant, en air, gestion des gaz d'échappement).

### **6.1.3. Vue innovation**

La tendance observée sur la consommation électrique des systèmes va se poursuivre conduisant au besoin de trouver des technologies offrant :

- Une meilleure densité énergétique et de puissance.
- Une durée accrue de mise en œuvre pour la mission

Ainsi, plusieurs axes d'innovation sont identifiés :

- Réduction de prix
- Augmentation des performances à iso coût- iso volume
- Maitrise des aspects sécuritaires
- Ajout de nouvelles fonctions

### **6.1.4. Contraintes d'intégration batteries**

Plusieurs ensembles de contraintes pèsent sur l'intégration des batteries.

1) Contraintes d'intégration dans le système véhicule

- Découpage organico-fonctionnel optimisé, volume et masse,
- Résistance à l'environnement : thermique, vibratoire, CEM, ...,
- Résistance aux menaces : balistique, blast, ...
- Interfaces standards : connecteurs, fixations ...

2) Contraintes d'intégration dans le système électrique

- Indicateurs de performance (niveau d'énergie, températures ...)
- Indicateur de maintenance (état de santé, ...)
- Diagnosticabilité (défauts, ...)

3) Contraintes règlementaires et sécurité

- Issus du civil : Norme 18-550, Interdiction du plomb, dégazage, emballage thermique
- Spécifique militaire : Qualité du réseau, cybersécurité

## **6.2. Intégration sur missiles**

### **6.2.1. Enjeux de l'énergie dans les missiles**

Un missile est un projectile autopropulsé qui peut être guidé après son lancement pour atteindre une cible précise. Par nature, hormis pendant la phase d'initiation sur sa plateforme de lancement, l'autonomie du missile lors de sa phase de vol implique d'embarquer une ou plusieurs sources d'énergie. Ces énergies sont essentielles aux fonctions d'autopropulsion, de guidage ou encore de navigation.

#### **Garantir un niveau de sécurité maximale du fait de la proximité de matière dangereuse**

Un missile est par nature un objet dangereux, car il contient des matières dangereuses (présence d'explosif primaire et secondaire). De ce fait, l'exigence de sécurité intrinsèque du missile est le premier des enjeux à tenir. La présence de source d'énergie au cœur même du missile doit être étudiée de manière scrupuleuse pour garantir que cette énergie ne sera activée qu'au moment requis, pendant la durée requise, et ne délivrera que le niveau d'énergie requis.

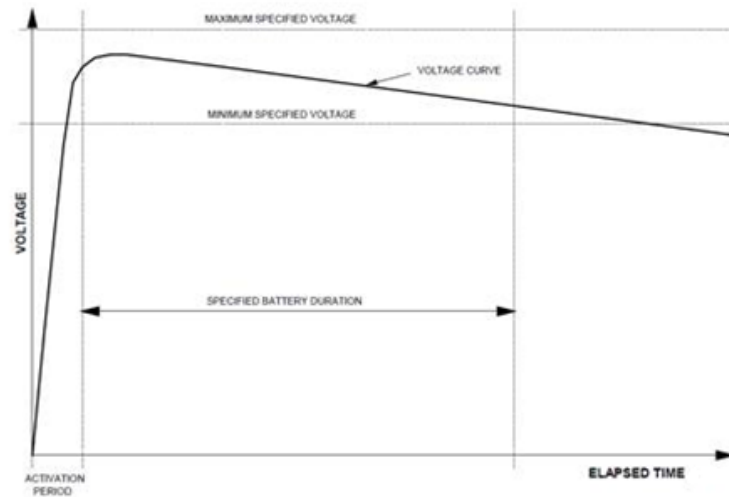
#### **Assurer une Probabilité de Bon Fonctionnement / Disponibilité importante sur une durée de vie potentiellement élevée**

La durée de vie des missiles est très variable, car elle dépend des emplois opérationnels prévus et imprévus. Ainsi, des phases de stockage importante peuvent coexister avec des phases d'utilisation opérationnelle intense. L'emploi opérationnel d'un missile est en réalité très dépendant du contexte géopolitique, et sa disponibilité opérationnelle est un facteur clé pour les Forces armées et Etats devant assurer leur défense. La disponibilité à tout instant d'un missile est entre autres garantie par la présence en tout temps d'une source d'énergie permettant d'activer le missile.

## Délivrer une quantité d'énergie intense mais brève, et ce sur une durée de vie / profil d'emploi importante

La mise en œuvre d'un missile est généralement une phase rapide (hormis les missiles de croisière) – entre quelques secondes et quelques dizaines de secondes.

L'intensité des missions assurées par le missile induit des temps d'activation très faibles pour les sources d'énergies. D'autre part, la complexité des équipements et les besoins en énergie (mise sous tension, activation pyrotechnique...) sont significatifs et requièrent des quantités d'énergies importantes sur une durée très brève.



*Courbe typique de montée en tension requise pour une alimentation missile.*

## Fournir des solutions à densité d'énergie maximale

Un missile est en général très contraint en termes de dimensions physiques, ou répond à des calibres standard de mise à poste, ou encore dépend des capacités d'emport de sa plateforme ou de l'opérateur des Forces dans le cas des missiles portés à dos d'homme. Ces contraintes d'environnement, associées à la mission de délivrance d'une charge utile maximale sur un objectif donné, induit un besoin de compacité et d'une densité d'énergie maximales des sources d'énergie.

## Besoin soutien : limiter l'empreinte logistique associée à ce besoin primaire

Comme tout système opérationnel, le missile possède son système de soutien. En plus des obligations réglementaires liées à la fabrication, l'entreposage, le recyclage ou réemploi, les utilisateurs sont particulièrement sensibles et exigeant vis-à-vis des moyens nécessaires pour assurer le soutien des sources d'énergie. On peut par exemple citer les moyens de chargement de batteries, les norias logistiques pour les piles du fait de la péremption de celles-ci, ou encore les emballages logistiques spécifiques pour le respect de la réglementation TMD (Transport Marchandises Dangereuses).

## Coût

Enfin, et le contexte budgétaire global en est un bon exemple, le facteur coût global de possession (depuis la phase d'acquisition, de développement, de qualification, de mise en service, d'exploitation, de retrait de service et de démantèlement) entre de plus en plus en ligne de compte. Malgré une part relativement faible de l'énergie dans le coût complet du système missile, ce facteur doit être analysé puisque les technologies envisagées et les exigences de durée de vie / fiabilité peuvent considérablement augmenter le coût de l'énergie dans une même famille de missile.

### 6.2.2. Situation actuelle

Les enjeux précédemment évoqués privilégient jusqu'à ce jour les technologies de type pile thermique, notamment vis-à-vis des caractéristiques de densité d'énergie, de stabilité chimique dans le temps avec des durée de vie supérieure à 15 ans, mais surtout de leur sécurité.

L'empreinte logistique, les coûts de développement / production et leur faible dangerosité sont des avantages considérables pour le coût global de possession des utilisateurs.

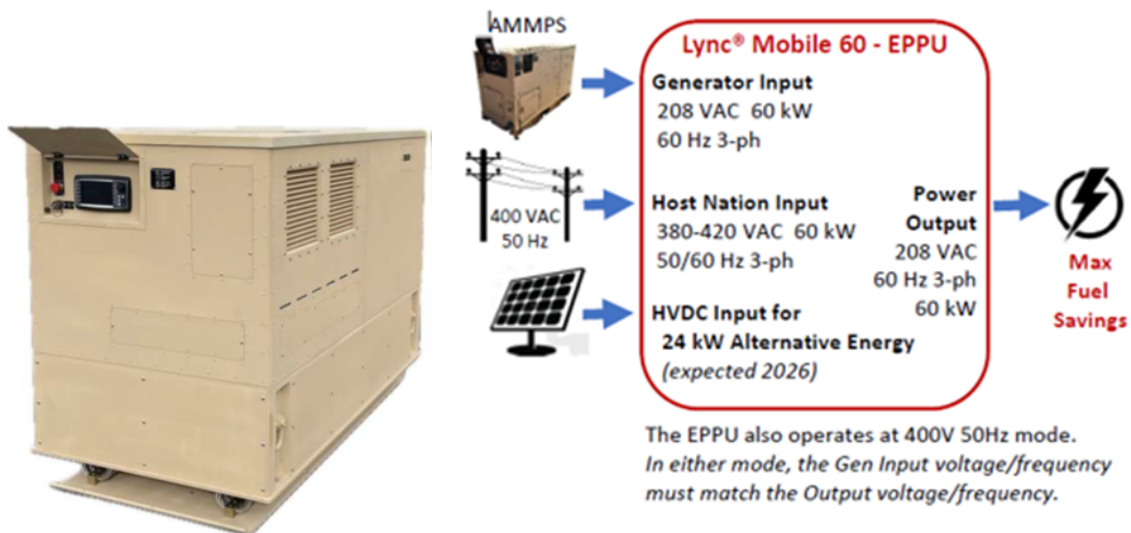
Par ailleurs, les investissements étatiques et industriels faits depuis des décennies en font une technologie particulièrement intéressante du point de vue de la souveraineté des approvisionnements avec une indépendance vis-à-vis de la chine en comparaison des batteries rechargeables.

### 6.3. Stationnaire : Energy Storage System

Les Energy Storage Systems (ESS) permettent de stocker l'énergie pour une utilisation ultérieure, jouant un rôle clé dans l'équilibre entre production / consommation et dans l'intégration des énergies renouvelables. Les systèmes de stockage intégrés combinant batteries lithium-ion, conversion de puissance et gestion énergétique, sont déployés mondialement pour l'intégration des énergies renouvelables, les services réseau, les data centers et les *microgrids* (Fourniture d'énergie stable sans infrastructure lourde).

Les ESS deviennent essentiels pour sécuriser l'approvisionnement énergétique, décarboner l'économie et renforcer la résilience des infrastructures

Ces systèmes répondent aux besoins en intégration solaire/éolienne, stabilisation du réseau, remplacement des groupes électrogènes pour data centers et optimisation des sites isolés.



*Expeditionary Portable Power Unit / Military Purpose : Universal Power & Energy Storage (source : SAFT)*

Face à l'évolution des opérations vers des environnements décentralisés, mobiles et énergivores, les ESS deviennent une plus-value décisive pour :

**Renforcer l'autonomie énergétique :** Les microgrids tactiques équipés d'ESS assurent une alimentation stable, une haute disponibilité et une réduction des pannes et des vulnérabilités.

**Réduire la dépendance logistique :** Les ESS permettent de limiter le nombre de convois de ravitaillement, souvent cibles d'attaques. Le stockage d'énergie réduit la dépendance aux générateurs diesel et diminue la consommation globale de carburant

**Sécuriser les opérations :** Les ESS civils sont conçus comme des modules conteneurisés, transportables, et prêts à l'emploi. Ces architectures "*plug and play*" facilitent la projection sur des bases avancées, des postes de commandement, des zones humanitaires ou de crise.

**Soutenir l'électrification croissante des systèmes militaires :** L'électrification croissante du champ de bataille (drones, capteurs, véhicules hybrides, communicateurs) nécessite une énergie propre et stable. Les ESS répondent à ce besoin en offrant des capacités de stockage modulaires et puissantes.

## 7. Spécificités de défense

### 7.1. *Militarisation de solutions civiles ou développements spécifiques*

La militarisation de solutions civiles désigne l'adaptation ou l'intégration de technologies, produits ou méthodes initialement conçus pour un usage civil dans des contextes militaires. Bien que leurs composants soient majoritairement issus du secteur grand public, les batteries militaires nécessitent une militarisation de l'offre civile reposant sur un savoir-faire spécifique. Celui-ci vise à exploiter les capacités des cellules aux limites de leurs technologies, notamment dans des conditions extrêmes, tout en assurant la conformité aux normes et la fiabilité opérationnelle. Ce phénomène s'accompagne souvent de développements spécifiques visant à répondre aux exigences particulières des forces armées. Dans un monde où la frontière entre civil et militaire s'estompe de plus en plus, il est essentiel de comprendre les enjeux, les processus et les impacts de cette transformation.

#### 7.1.1. *Définition*

La militarisation implique la modification de solutions civiles pour répondre à des besoins de défense. Les développements spécifiques correspondent à des adaptations techniques, réglementaires ou fonctionnelles permettant à ces solutions de satisfaire aux normes militaires, notamment en matière de robustesse, sécurité et interopérabilité.

#### 7.1.2. *Processus de militarisation*

- Identification des besoins militaires : Les armées analysent les technologies civiles disponibles pour déterminer celles qui pourraient améliorer leurs capacités opérationnelles.
- Adaptation technique : Cela comprend le renforcement des dispositifs, l'ajout de fonctionnalités spécifiques (cryptage, communication sécurisée, résistance aux conditions extrêmes, etc.).
- Homologation et certification : Les solutions adaptées doivent répondre à des standards militaires stricts, souvent plus exigeants que ceux du secteur civil.
- Intégration opérationnelle : Les produits ou services sont ensuite intégrés dans les systèmes militaires existants, parfois en coopération avec les industriels civils.

#### 7.1.3. *Enjeux et défis*

- Questions éthiques et juridiques : L'utilisation de solutions civiles dans des contextes militaires soulève des interrogations sur la responsabilité des fabricants et sur le contrôle de l'utilisation finale.
- Sécurité et souveraineté : Adapter des solutions civiles peut exposer les forces armées à des vulnérabilités si les produits ne sont pas suffisamment sécurisés ou si leur dépendance à des fournisseurs étrangers est trop forte.
- Innovation et dualité technologique : La militarisation encourage l'innovation, mais peut aussi entraîner une compétition accrue entre secteurs civil et militaire, avec des répercussions sur la disponibilité et le coût des technologies.

#### 7.1.4. *Acteurs civils et militaires*

Seul le secteur civil des batteries est capable, du fait des volumes traités, de développer de nouvelles technologies, notamment en rupture. L'adaptation des produits issus du monde civil doit prendre en compte les spécificités militaires en matière notamment d'environnement, de contraintes d'emploi, de sécurité, d'interopérabilité voire de performances spécifiques.

Pour les forces armées, l'intégration de solutions civiles permet donc d'accélérer la modernisation et de bénéficier de l'agilité du secteur privé, tout en posant de nouveaux défis en matière de sécurité et de fiabilité.

Il faut être conscient du fait que l'intégration de cellules civiles, principalement asiatiques, dans des applications militaires européennes et américaines pose des défis majeurs en matière de souveraineté, de sécurité d'approvisionnement et de maîtrise technologique.

#### Qualification et impact économique

Les coûts de qualification et de certification des batteries militaires (normes UN, IEC, etc.) sont particulièrement élevés, notamment en raison du nombre important d'échantillons requis pour les essais. Cette contrainte pèse fortement sur l'économie globale des programmes.

Un déséquilibre majeur existe entre le coût de développement et de qualification d'une batterie spécifique et son coût de production unitaire, avec un ratio pouvant atteindre 1 000. Ce modèle économique supposerait des volumes de production élevés pour être rentable, alors que les batteries militaires sont le plus souvent produites en petites séries.

La maîtrise des coûts sur l'ensemble de la chaîne de valeur est donc un impératif. Elle repose directement sur la maîtrise des spécificités techniques : plus les exigences sont précisément définies, plus les risques de dérive de coûts sont limités.

À cet égard, la précision des spécifications est déterminante. Des normes telles que la MIL-STD-810H offrent de multiples méthodes et paramètres pour chaque type d'essai. Une exigence formulée de manière trop générale (par exemple « conformité à la MIL-STD-810 ») ouvre la voie à des interprétations divergentes, à des sur-spécifications et, in fine, à des surcoûts significatifs. Il est essentiel de détailler explicitement les méthodes de test et leurs paramètres.

Les spécifications doivent par ailleurs être strictement adaptées à l'application. Un profil de vibration destiné à une batterie de radio portative ne peut être dimensionné comme celui d'un équipement soumis aux chocs et vibrations d'un tir de canon. L'adéquation entre exigence et usage est un levier majeur d'optimisation technico-économique.

Enfin, un besoin clair d'harmonisation apparaît entre les spécifications générales et les exigences propres aux systèmes. Cette harmonisation devrait être impulsée par le client initial (DGA, par exemple), afin de limiter les sur-spécifications tout en garantissant une transcription fidèle des besoins opérationnels. La promotion d'un format de spécification standard irait dans ce sens, même si elle doit composer avec la nécessité de personnaliser les batteries pour chaque système.

La standardisation des composants constitue ainsi un facteur clé de réduction des coûts, tandis que la personnalisation demeure indispensable. L'efficacité du processus dépend également de la qualité des échanges entre les acteurs, le dialogue technique semblant généralement plus fluide avec les MOI « systémiers » qu'avec les grands équipementiers.



### **7.1.5. Synthèse**

La militarisation des solutions civiles constitue aujourd'hui un levier incontournable pour répondre aux besoins énergétiques croissants des forces armées. Si elle permet de tirer parti de technologies issues du secteur grand public, elle révèle toutefois des limites structurelles majeures dès lors que les exigences militaires en matière de robustesse, de sécurité, de longévité et de fiabilité opérationnelle deviennent critiques.

Le recours à des cellules civiles, souvent d'origine asiatique, expose en outre les programmes de défense à des risques accrus de dépendance technologique, de fragilité des chaînes d'approvisionnement et de perte de souveraineté industrielle. Ces vulnérabilités sont renforcées par des coûts de qualification et de certification très élevés, difficilement amortissables dans un contexte de petites séries, et par des spécifications parfois trop générales, sources de sur-spécifications et de dérives économiques.

Dans ce contexte, la performance technico-économique des batteries militaires repose sur deux piliers indissociables : la maîtrise fine des exigences et des processus de qualification, et une harmonisation renforcée des spécifications entre les acteurs, impulsée par le client étatique. La standardisation raisonnée des composants, combinée à une personnalisation strictement adaptée aux usages, apparaît comme la voie la plus pertinente pour concilier performance, maîtrise des coûts et autonomie stratégique.

## **7.2. Standardisations**

### **7.2.1. Définition**

La standardisation vise à améliorer la sécurité, la performance, l'interopérabilité et la maintenance des batteries dans des environnements militaires exigeants. Elle permet également de faciliter la logistique, de réduire les coûts et d'optimiser la disponibilité opérationnelle.

### 7.2.2. Principaux axes de standardisation

- **Standardisation des formats de cellules** (ex : cylindrique, medium prismatique, format pouch) pour maximiser la synergie entre filières civiles et militaires, tout en permettant l'interchangeabilité et la compatibilité des batteries entre différents équipements.
- **Battery Management System (BMS)** : La standardisation du BMS est essentielle pour assurer la surveillance, la protection, l'équilibrage et la communication des batteries avec les systèmes d'armes ou de véhicules. Les interfaces de communication (CAN, SMBus, etc.) doivent être harmonisées pour garantir l'interopérabilité entre équipements de différentes origines. Procédures d'essais et de qualification
- **Définition de formats universels** : Adoption de formats reconnus pour les applications militaires, en s'appuyant sur les standards et les recommandations européennes. Harmonisation des dimensions, des tensions nominales, des connectiques et des interfaces mécaniques et électriques.
- **Procédures d'essais et de qualification** : Définir des référentiels communs pour les tests de robustesse, sécurité, performance et durée de vie, adaptés aux contraintes militaires (normes MIL-PRF, IEC, OTAN). Accréditer des laboratoires spécialisés pour garantir la conformité des batteries aux exigences militaires.
- **Traçabilité et souveraineté** : Mettre en place des exigences strictes de traçabilité des composants et de la chaîne d'approvisionnement pour garantir la sécurité et l'autonomie stratégique. Favoriser la production française voire européenne de batteries et de composants critiques pour limiter la dépendance aux fournisseurs étrangers.

La standardisation des batteries militaires ne saurait se limiter à une simple harmonisation technique ; elle s'inscrit dans une dynamique stratégique globale, à l'interface de la souveraineté technologique, de la résilience opérationnelle et de l'innovation industrielle. Dans un contexte géopolitique marqué par la volatilité des chaînes d'approvisionnement et la montée des menaces hybrides, la capacité des forces armées à disposer de solutions énergétiques fiables, interopérables et sécurisées devient un facteur déterminant de supériorité tactique et de liberté d'action.

## 7.3. Normes issues du monde civil

### 7.3.1. Monde civil - Évolution des normes (France – Europe – Chine)

**Pourquoi l'automobile est intéressante à étudier pour les réglementations et quel est le contexte actuel ?**

Il est intéressant de surveiller les évolutions de réglementations dans l'automobile, cette dernière étant devenu le premier utilisateur en termes de GWh de batteries lithium-ions, et de très loin. Et c'est également une industrie très réglementée d'où l'intérêt de se concentrer sur ce domaine.

Avec plus de 10 millions de véhicules de tourisme (« *passenger cars* ») électriques vendus l'an dernier dans le monde, nous ne sommes plus au début de l'introduction sur le marché, mais bien dans une situation bien plus mature. Augmenter encore l'acceptation de ce type de véhicules passe par de nombreuses étapes, notamment l'augmentation de l'infrastructure de charge, la facilité de gestion des phases de recharge, des prix plus attractifs, une dépréciation contrôlée, etc. et surtout une sécurité et une sûreté de fonctionnement irréprochable, et ce dans toutes les conditions. Ajouté à cela, une augmentation des performances, notamment de charge (nous considérons l'état de l'art à 300-350 kW aujourd'hui, et des véhicules sortent aujourd'hui à 450-500 kW sur des bornes domestiques, avec BYD qui atteint sur la Han L 1,000 kW en pic pendant 10 secondes – des concepts sont actuellement présentés pour stabiliser à 800 kW, etc.), mettant à rude épreuve les batteries, participe à renforcer la réglementation de ces véhicules et des batteries en particulier. C'est dans ce contexte que les réglementations globales évoluent afin de faire des batteries toujours plus sûres, malgré leurs performances accrues.

N.B : Pour l'Europe, il est également important d'aborder la « *Battery Regulation* » qui remplace la « *Battery Directive* », et qui statue sur le cycle de vie des batteries, le recyclage des matières premières, et la traçabilité à partir d'un certain contenu énergétique – extrêmement impactant pour de nombreuses industries civiles, cette partie sera traitée séparément.

**En quoi consistent les réglementations qui ont trait aux batteries haute tension utilisées sur des véhicules particuliers ?**

Ces réglementations s'appliquent aux batteries haute tension utilisées dans les véhicules électriques et hybrides, et couvrent les cellules, les modules et le pack ainsi que l'intégration dans le véhicule.

Elles consistent généralement en une série de mesures (e.g., surveillance de l'isolation, système de thermal management, mesure pour prévenir et arrêter certaines défaillances, etc.) ainsi que des tests plus ou moins sévères et représentatifs de situations de vie rencontrées par un véhicule de ce type (e.g., mécanique (vibration,

impact, crush), électrique (surcharge, court-circuit), thermique (exposition à la chaleur, propagation), et environnemental (humidité, brouillard salin, immersion, etc.), et stipule un certain résultat permettant de protéger contre le feu, les explosions, les chocs électriques, l'émission de gaz toxiques, etc. Par exemple, cela permettrait d'éviter qu'un feu aux conséquences extrêmement importantes ne soit déclaré suite à un crash d'un véhicule contre un obstacle endommageant le pack batterie.

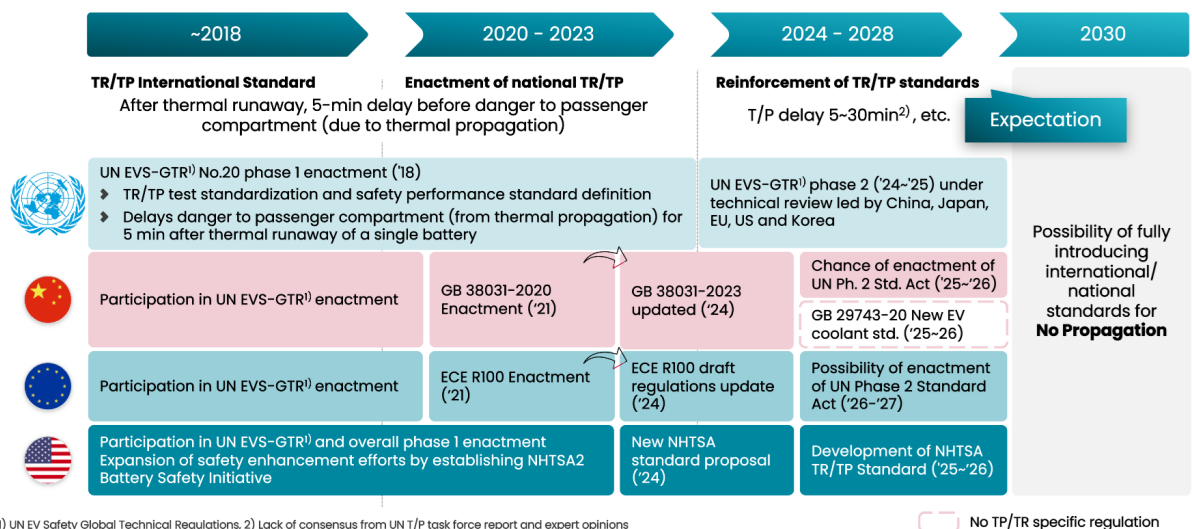
Il y a aussi les réglementations au sujet du transport (UN 38.3), mais celle-là n'est pas spécifique à l'automobile.

### Quel est le statu-quo sur la réglementation aujourd'hui, et d'où est-on parti ?

Le développement des réglementations au sujet de la batterie est inégal suivant les régions du monde.

## China and Europe have mandatory TR and TP requirements that must be met, with further tightening possible in the future

REGULATORY FRAMEWORK – TIMELINE



### Illustration du développement des réglementations

Alors que la réglementation des batteries de véhicules électriques est cadrée par les UNECE R100 / UNGTR20 reconnues globalement, il est intéressant de noter les évolutions tirées individuellement par des régions spécifiques.

La Chine, par exemple, a pu utiliser par le passé certains leviers pour des raisons supposées de protectionnisme économique : il fût un temps où elle avait introduit des restrictions ou désincitations au sujet de la technologie NMC (technologie sur laquelle la Corée du Sud dépassait la Chine) afin de pousser la technologie développée domestiquement (LFP). Il est intéressant de noter que les réglementations n'agissent pas seulement sur l'utilisation et la sécurité des batteries, mais peuvent avoir un double levier afin de protéger d'autres intérêts. Il est donc indirectement possible de promouvoir les technologies domestiques déjà développées et maîtrisées pour asseoir la supériorité des industries domestiques dans ce domaine, et de potentiellement verrouiller encore plus l'accès aux constructeurs étrangers au marché domestique.

La GB 38031 est maintenant vue comme le maître-étalon dans l'automobile, cette dernière étant une des normes les plus sévères pour les batteries automobiles lorsqu'elle a été implémentée au début des années 2020 (alors qu'elle se basait sur des normes existantes). Notons que GB (*Guo Biao*) réfère aux normes obligatoires, alors que GB/T désigne les normes volontaires. La première mouture (GB38031-2020) a été en effet la première à légiférer sur un temps minimal entre la détection d'un emballement thermique sur une cellule et le début de la propagation de l'évènement thermique à une autre cellule ou en dehors du pack batterie. Une alerte devait être émise dès la dite-détection afin d'avertir les utilisateurs et de permettre suffisamment de temps pour pouvoir manœuvrer le véhicule en sécurité et laisser suffisamment de temps pour évacuer. De nombreux tests spécifiques étaient spécifiés afin de cadrer les mesures (e.g., crush, sur-charge, impact thermique, avec essais vibration, brouillard salin, extrusion, essais abusifs électriques, etc.).

Suite à l'émission de cette norme, la norme ECE R100 pour l'Union Européenne a adopté un contenu similaire, demandant aux constructeurs de fournir un dossier prouvant que le constructeur a réalisé les tests requis – de nombreux éléments ont été repris, sans toutefois être aussi sévère que la norme Chinoise sur certains points.

## Quels sont les toutes dernières évolutions de la norme GB38031 ?

La Chine est encore allée plus loin en annonçant la GB38031-2025 cette année. Cette dernière concerne toutes les nouvelles réceptions par titre à partir de juillet 2026, et les plateformes déjà existantes devront s’y conformer à partir de 2027. Ce qui signifie que de nombreux développements sont en cours afin de respecter cette nouvelle norme, rappelons que 2 ans pour redévelopper un pack batterie est très court, lorsque l’on comptabilise le choix des cellules (en poursuivant les évolutions en termes de densité et contenu énergétique et puissance de charge), l’adaptation aux plateformes de véhicules, les tests requis, etc.

C’est le MIIT (Ministère de l’Industrie et de la Technologie Chinois) qui a renforcé l’aspect centré sur le consommateur final/conducteur, afin d’être leader sur l’aspect réglementaire au niveau de la sécurité des batteries. Cette dernière mouture est la première norme exigeant que les flammes ne soient plus émises en continu à la suite d’une détection d’emballement thermique au niveau d’une cellule – en d’autres termes : **zéro propagation**. On retrouve souvent cette appellation ZeroTP, OTP ou NTP pour No Thermal Propagation. Pas de feu, pas d’explosion, pas de fumées toxiques est requis. Des tests additionnels d’intrusion par le dessus, ainsi que des tests successifs à une charge rapide complexifient le design des packs. Ces nouveaux tests concernent par exemple le test de la boule de métal de 30 mm frappant le pack par-dessous, avec une énergie de 150 J, à trois reprises : aucune fuite, cassure, feu ou encore explosion n’est permise.

Ce contexte pose la question pour les constructeurs auto de refondre leurs programmes, et donc d’augmenter encore plus les investissements

## Quels impacts cela aura sur le design des packs batteries ?

Clairement, cela pousse d’abord pour l’utilisation de cellules utilisant des chimies moins réactives, par exemple le LFP par rapport au NMC, mais également un facteur de forme permettant la dissipation de la chaleur en cas d’emballement thermique ou de perçage.

Des améliorations au sein d’une cellule donnée sont aussi considérées, avec des éléments tels qu’un électrolyte plus stable thermiquement, des revêtements spécifiques sur les électrodes pour réduire la réactivité en cas d’anomalie, etc.

### CATL has developed advanced thermal safety technologies on cell and system-level, which are integrated e.g. in its Qilin cell-to-pack battery

FEV CONSULTING

CATL “NO PROPAGATION 2.0” BATTERY TECHNOLOGY

Case study CATL

<p>TR prevention</p>	<p>CATL's Qilin battery 3rd generation CTP</p>	<p><b>T°C resisting cathode</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mix of certain metal elements with typical cathode active materials</li> <li>Improve thermostability of e.g. high-Ni NMC 811 by lowering the possibility of oxygen release while maintaining energy density</li> </ul>	<p><b>Safe-coating technology</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nano-coating technology forming a <b>solid electrolyte membrane</b> on the electrode surfaces</li> <li>Lower the reactivity between electrode &amp; liquid electrolyte and improving thermostability</li> </ul>	<p><b>High-safety electrolyte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Functional additives modifying the electrolyte composition for <b>reduction of heat generation</b> during electrode-electrolyte reactions</li> <li>Reduce heat generation and improve temperature resistance</li> </ul>
		<p><b>Self-stabilization</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Self-stabilizing system with <b>gas-electric separation &amp; active isolation between cells</b></li> <li>Optimized safety and integration, achieving high energy density values</li> </ul>	<p><b>Big Data early warning system</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Preventive</b> system based on <b>real-time monitoring</b> of the battery system for identification of abnormalities</li> <li>Increase cell control to identify early warnings before a fault occurs</li> </ul>	<p><b>Self-cooling technology</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Active early warning</b> model developed via big data, initiating cooling strategy in extreme circumstances</li> <li>Reduce the extinguishing time and mitigate thermal propagation</li> </ul>

CTP: Cell to Pack

Description of measure Target

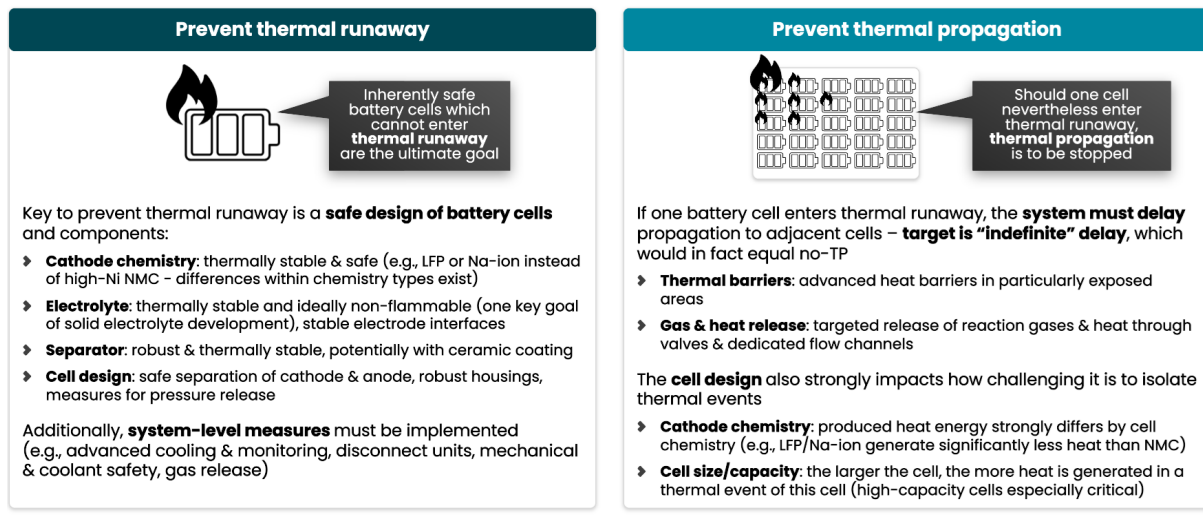
### Solutions technologiques pour la sécurité thermique (source : FEV)

Des efforts seront aussi considérés dans le confinement d’éventuelles températures importantes grâce à l’emploi de système d’isolation thermique, mais aussi dans des caissons/housing plus solides, notamment sous la caisse. Des mesures de préventions pourront être prises aussi avec des liquides de refroidissement à faible conductivité électrique ou bien non conducteur (dé-ionisé), ou des systèmes de coupure d’alimentation en liquide de refroidissement en cas de détection d’une fuite dans le pack.

## OEMs and battery manufacturers are aiming to go significantly beyond the regulatory targets and are developing “no-TP” solutions

FEV  
CONSULTING

### APPROACHES TOWARDS NO THERMAL PROPAGATION



*Améliorer la sécurité thermique (source : FEV)*

Des changements dans le processus de design et validation sont également à considérer.

### Quid de l’Europe sur cet aspect sécuritaire ?

L’Union Européenne semble prendre la direction de batteries encore plus sûres, avec une volonté d’atteindre le zero TP – des constructeurs automobiles arrivent déjà à l’atteindre – cela dit, les exigences ne sont pas aussi importantes que celles qui viennent d’être adoptées en Chine.

Nous en sommes à la Rev. 3 de la ECE R100.

### Quid de la battery regulation en Europe ?

Sans lien avec la sureté des batteries, cette dernière concerne plus le coté soutenable de l’industrie liée aux batteries, pas seulement automobile.

Effective depuis 2023, elle encadre l’utilisation de matériaux tels que le mercure, le cadmium et le plomb, et oblige un certain contenu en matière recyclée à partir de 2031 (16% de Cobalt, 85% de plomb et 6% de Lithium / Nickel). Aussi cette réglementation encadrera l’empreinte carbone liée à la production et au transport, avec un étiquetage adéquat, permettant d’assurer plus de traçabilité. La réparabilité est également visée, toujours dans le but de responsabiliser plus le producteur de ces batteries afin de garantir une industrie plus soutenable et responsable

Le règlement (UE) 2023/1542 vise à garantir des batteries sûres, durables et traçables dans l’Union européenne. Il est détaillé en Annexe au § 10.4.

### *7.3.2. Impact et recommandations pour la défense*

Dans le cadre du développement et de l’intégration de systèmes batteries haute tension (tension supérieure à 350 V et capacité supérieure à 50 kWh) destinés aux applications Défense, notamment dans le domaine de la mobilité ou pour certaines installations stationnaires, il apparaît pertinent de privilégier une approche de standardisation s’appuyant majoritairement sur les normes civiles existantes, tout en les complétant par un nombre limité d’exigences spécifiques aux besoins opérationnels militaires.

### S’appuyer sur les standards civils éprouvés

Le recours à des normes déjà déployées et éprouvées dans le civil (automobile, ferroviaire, transport public, stockage stationnaire) permet de bénéficier :

- d’un écosystème industriel existant et mature (fournisseurs, laboratoires d’essais, organismes de certification),
- d’une optimisation des coûts de développement et de qualification,

- d'une meilleure maîtrise des risques industriels et calendaires,
- et, dans une certaine mesure, d'une amélioration de la souveraineté par la consolidation d'acteurs français et/ou européens déjà en place.

À l'inverse, le développement de standards entièrement spécifiques à la Défense, notamment pour les essais abusifs ou de qualification lourde, impliquerait sinon la mise en place de centres d'essais dédiés coûteux, au moins l'utilisation de centres « civils » adaptés lorsqu'ils existent. Compte tenu des volumes relativement faibles des applications Défense par rapport au marché civil, la viabilité économique de telles infrastructures spécifiques apparaît limitée au regard des coûts globaux de développement.

### **Limiter la sur-spécification et préserver la compétitivité technologique**

Une sur-spécification des packs batteries, au-delà des exigences réellement nécessaires au contexte Défense, peut engendrer :

- une complexification significative de la chaîne d'approvisionnement,
- une réduction du nombre de fournisseurs qualifiés,
- des difficultés de production et de montée en cadence,
- ainsi qu'une augmentation notable des coûts unitaires.

Par ailleurs, des exigences excessives en matière de robustesse ou de protection peuvent conduire à une dégradation importante de la densité énergétique des packs lithium-ion, réduisant ainsi leur intérêt opérationnel et leur compétitivité par rapport aux solutions civiles les plus avancées.

Il est donc recommandé de rechercher un juste équilibre entre robustesse militaire et performance énergétique, en évitant toute exigence non strictement justifiée par les cas d'emploi.

### **Définir un socle d'exigences spécifiques Défense ciblées**

En complément des normes civiles, un nombre restreint d'exigences spécifiques Défense pourrait être défini, portant notamment sur :

- La sécurité fonctionnelle et l'architecture système, incluant la gestion des défaillances, la mise en sécurité automatique, la dégradation maîtrisée et la séparation fonctionnelle entre puissance et commande ;
- La robustesse environnementale, afin de couvrir les conditions d'emploi militaires (températures extrêmes, vibrations, chocs, poussières, humidité, stockage longue durée) ;
- La cybersécurité et l'intégrité logicielle, en particulier pour les systèmes de gestion de batterie (BMS), incluant la protection contre les intrusions, la falsification logicielle et la maîtrise des mises à jour ;
- Le maintien en condition opérationnelle (MCO), avec des exigences relatives à la durabilité, à la réparabilité, à la modularité, au diagnostic et à la gestion du vieillissement sur des durées de vie longues.

Ces exigences devraient être définies de manière transverse et pragmatique, sans remise en cause potentiellement chronophage des standards civils existants.

### **Capitaliser sur les retours d'expérience des transports publics**

Les secteurs ferroviaire et des transports publics électriques (trains, métros, bus) constituent des sources d'inspiration particulièrement pertinentes. Les normes et pratiques associées à ces domaines présentent :

- des niveaux élevés de sécurité et de fiabilité,
- une forte exigence en matière de sûreté de fonctionnement,
- et des contraintes opérationnelles sévères liées au transport de personnes.

L'adaptation raisonnée de certains de ces standards aux besoins Défense permettrait de renforcer la robustesse des systèmes tout en s'appuyant sur des cadres normatifs déjà validés à grande échelle.

### **Gouvernance et collaboration industrielle**

Il est enfin recommandé que les maîtres d'œuvre industriels (MOI) et les autorités étatiques concernées (e.g., DGA), collaborent étroitement afin :

- d'identifier les standards civils les plus pertinents, (ECE R100, GB/T 38031-2025, ISO26262, IEC62619, UN38.3, etc.)
- de définir collectivement les exigences Défense complémentaires réellement nécessaires, (e.g., essais balistiques avec munition spécifiques dans un état batterie donnée, chocs spécifiques, etc.)
- et d'assurer une cohérence globale entre performance opérationnelle, sécurité, soutenabilité industrielle et maîtrise des coûts.

## 7.4. Qualifications et/ou sur spécifications du monde de la défense

Le secteur de la défense, confronté à l'accélération des besoins en systèmes énergétiques autonomes et portables, navigue au milieu d'un paradoxe économique criant. Les solutions de stockage d'énergie, principalement les batteries basées sur la technologie Lithium-Ion (Li-ion), reposent très majoritairement sur des composants et des cellules issues de l'état de l'art civil et grand public (automobile, IT, téléphonie). Le volume et l'innovation du marché de masse financent le développement de ces briques technologiques essentielles.

Pourtant, une fois ces composants intégrés dans une enveloppe "militaire", leur coût d'acquisition final s'avère exponentiel. Ce surcoût n'est pas le reflet d'une supériorité technologique intrinsèque au niveau de la cellule, mais est principalement attribuable à l'ensemble des exigences de qualification, de durcissement et des cycles de tests environnementaux rigoureux.

Si ces exigences sont le garant de la fiabilité opérationnelle, leur application excessive ou leur mauvaise formulation conduisent inéluctablement à un phénomène de sur-spécification et de sur-qualifications. Ce phénomène détériore l'équilibre coût-performance-volume, pèse lourdement sur les budgets d'acquisition et ralentit la mise à disposition de solutions performantes pour les forces.

Ce paragraphe analyse l'impact des spécifications sur le coût global des composants électrochimiques à vocation militaires, hors drone. Il identifie le rôle critique de la précision dans les documents d'exigences et propose une approche structurée et standardisée pour garantir une soutenabilité économique de l'approvisionnement en énergie des forces armées.

### 7.4.1. Analyse des coûts des batteries de combat

#### L'origine civile des éléments de base et le savoir-faire de l'intégrateur

Une batterie militaire moderne est, à la base, un assemblage sophistiqué de composants non durcis (les cellules électrochimiques, les cartes de BMS, les microprocesseurs et l'électronique de contrôle) qui proviennent des mêmes chaînes de production que leurs équivalents civils.

La véritable valeur ajoutée de l'intégrateur défense réside dans son savoir-faire propriétaire et son architecture système, et non dans l'invention de la cellule elle-même. Ce savoir-faire se concentre sur le BMS (*battery management system*) et son logiciel de gestion. Le système de gestion de batterie (BMS) est conçu non seulement pour la sécurité, mais surtout pour pousser les performances des cellules au-delà des limites énoncées par les fabricants civils. Par exemple, l'intégrateur peut concevoir un BMS capable de gérer la charge à -20°C ou même -30°C, là où la fiche technique civile n'autorise la charge qu'à partir de 0°C. Ce durcissement est logiciel et algorithmique (gestion thermique, équilibrage actif/passif, estimation d'état de charge/santé).

Le Battery Management System constitue un élément stratégique au sein d'un système batterie, bien au-delà d'un simple module de mesure. Il assure l'estimation précise des états internes (état de charge total et utilisable, état de puissance, état de santé), le contrôle des relais de puissance et de précharge, la gestion thermique, les stratégies d'équilibrage, ainsi que la détection et l'isolation rapide des défauts.

La performance globale d'un pack dépend ainsi directement de la qualité de son BMS : même avec des cellules lithium-ion très performantes, un système peut devenir sous-exploité, instable ou dangereux si le BMS n'est pas au niveau. Les algorithmes avancés — modèles électrochimiques, IA/ML, équilibrage optimisé — permettent d'augmenter l'énergie utilisable de 5 à 10 %, d'étendre la durée de vie de 20 à 30 %, ou encore de réduire la marge d'erreur d'estimation du SoC sous les 2 %.

Cette valeur ajoutée repose sur un développement matériel et logiciel exigeant, mobilisant microcontrôleurs critiques, ASICs de mesure, savoir-faire, capteurs haute précision et contacteurs HV, dont l'approvisionnement constitue un enjeu de souveraineté industrielle. La transparence des algorithmes internes est également essentielle : soit le fournisseur décrit précisément les modèles et leurs limites, soit le spécifiant impose un cahier des charges suffisamment bas niveau pour garantir la maîtrise et la validation des comportements.

Ainsi, deux BMS conçus pour des cellules identiques peuvent ainsi conduire à des performances, des durées de vie et des niveaux de sûreté radicalement différents, faisant du BMS un facteur différenciant majeur dans la chaîne de valeur des batteries.

**Recommandation 1** Facteur déterminant pour la performance et la sécurité de batteries de combat, rendre obligatoire la mise en place de BMS sur les batteries de combat.

L'architecture mécanique et thermique : l'intégration de dissipateurs thermiques ou de systèmes de chauffage (pour les climats froids), et la conception d'un boîtier résistant aux chocs et vibrations tout autant que l'implantation de dispositifs de coupure pour en améliorer la sécurité d'emploi opérationnel.

Cependant, cette valeur ajoutée est largement obscurcie par l'investissement financier requis pour la qualification.

### L'impact massif de coûts non-récurrents (NRE)

La barrière qui sépare le composant civil du composant militaire est financière, et prend la forme des coûts non-récurrents (NRE) de qualification. Ces tests se basent sur des standards exigeants, principalement les MIL-STD américains (souvent traduits en STANAG au niveau de l'OTAN).

Les principales familles de tests sont :

- Normes Environnementales (MIL-STD-810) : Température de fonctionnement et de stockage étendue (jusqu'à -40°C ou +70°C), résistance aux chocs, aux vibrations, à l'immersion (IP), à l'altitude et à la corrosion saline.
- Normes Électromagnétiques (MIL-STD-461) : Garantir que l'émetteur ne perturbe pas la radio et inversement.
- Normes de Sécurité et Transport (UN 38.3, IEC 6233-2, EU Battery Regulation 2023-1542) : Essais de sécurité liés à l'abus (court-circuit, surcharge, pénétration, choc) et conformité au transport.

Ces cycles de tests, nécessaires à l'obtention de la certification militaire, requièrent la fourniture de nombreux échantillons (souvent destructifs) et la mobilisation d'infrastructures de test coûteuses.

Exemple critique d'amortissement : Pour une batterie spécifique d'alimentation radio militaire d'énergie < 100 Wh, le coût unitaire des composants de base est d'environ 250 €. L'effort total de conception, de tests et de qualification (NRE) peut s'élever à plus de 250 000 €. Dans cet exemple, pour absorber ce NRE, l'industriel doit produire et vendre plus de 1000 unités à un prix unitaire doublé (par exemple, 500 € l'unité, incluant l'amortissement du NRE) pour atteindre l'équilibre. Or, la fragmentation des besoins militaires conduit souvent à des volumes de production bien inférieurs à ce seuil critique, rendant l'investissement initial non rentable et perpétuant des coûts unitaires qui sont élevés. Phénomène accru, particulièrement en France, par le manque de visibilité et d'engagements sur le besoin global des programmes.

### 7.4.2. L'enjeu critique de la sur-spécification

#### L'ambiguïté des références normatives et le défaut de renseignement opérationnel (DRO)

La racine du problème réside dans la formulation des cahiers des charges. L'exigence de conformité à une norme générale sans précision sur son application crée une zone grise contractuelle :

La citation vague : La simple mention "Conforme à la MIL-STD-810" est insuffisante. La MIL-STD-810 est un document volumineux (Le document <https://www.atec.army.mil/publications/Mil-Std-810G/Mil-Std-810G.pdf> comporte 1089 pages...) qui présente des dizaines de méthodes de test (méthode 500.6 pour la basse pression, 514.8 pour les vibrations, etc.), chacune ayant des profils et des intensités variables.

Le piège de l'exhaustivité : Face à l'ambiguïté, le fabricant de batterie, intégrateur, est contraint, soit par prudence, soit par l'interprétation la plus stricte de la norme, de choisir le scénario de test le plus sévère et potentiellement non pertinent pour l'emploi final. Ce sur-test crée un surcoût direct.

Cette ambiguïté est souvent aggravée par un défaut de renseignement opérationnel. Les équipes de spécification n'ont pas toujours le profil opérationnel exact (températures réelles d'utilisation, historique de chocs, durée d'immersion nécessaire, profil de décharge) voulu par l'utilisateur final. Il en résulte une exigence générique, déconnectée de la réalité du terrain, induisant des surcoûts.

Category	Parameter
Electrical	Chemistry
Electrical	Nominal Voltage
Electrical	Maximum Voltage
Electrical	Minimum Voltage

Electrical	Configuration
Electrical	Continuous Discharge Power
Electrical	Minimum Capacity
Electrical	Cycle life
Electrical	Communication protocol
Mechanical	Weight
Mechanical	Color
Mechanical	Materials
Mechanical	SOP interface
Mechanical	Mounting
Mechanical	Cooling rate
Mechanical	Cap cover
Environmental Conditions	High Temperature Operation
Environmental Conditions	Low Temperature Operation
Environmental Conditions	High Temperature Storage
Environmental Conditions	Low Temperature Storage
Environmental Conditions	Humidity
Environmental Conditions	Moisture
Environmental Conditions	Immersion
Environmental Conditions	Dust
Environmental Conditions	Sand
Environmental Conditions	Shock
Environmental Conditions	Vibration (transportation)
Environmental Conditions	Solar radiation
Environmental Conditions	Altitude storage
Environmental Conditions	Altitude operation
EMC/EMI	MIL-STD-461 conditions
EMC/EMI	MIL-STD-461F RE102-A
EMC/EMI	MIL-STD-461F RE102-B
EMC/EMI	IEC 61000-4-2
EMC/EMI	Minimum data required
Communication	
User Guide	Maintenance recommendations
Reliability	
Environment & Safety Regulations	Hazardous Material Restrictions

Environment & Safety Regulations	REACH
Environment & Safety Regulations	EU Battery Regulation (2023/1542)
Environment & Safety Regulations	IEC certification
Environment & Safety Regulations	UN38.3

*Exemple de « juste spécification » pour une batterie de combat pour le combattant débarqué.*

### Les conséquences du surdimensionnement

Le surdimensionnement des performances d'une batterie pour satisfaire un test non pertinent génère un coût inutile et une dégradation de l'ergonomie opérationnelle.

Type de Sur-spécification	Conséquence sur le Coût	Impact Opérationnel
Vibration/Choc Exagérés	Nécessite des enveloppes mécaniques beaucoup plus robustes, des matériaux onéreux (alliages spéciaux, boîtiers épais), et des structures d'amortissement complexes.	Conduit à une batterie excessivement lourde et volumineuse, allant à l'encontre de la doctrine d'allègement de la charge du combattant débarqué.
Profil Thermique Non-Ciblé	Nécessite des composants électroniques plus chers, des isolants spécifiques et des mécanismes de chauffage/refroidissement actifs, souvent inutiles pour la majorité des missions.	Réduit l'autonomie en puisant de l'énergie pour des fonctions d'auto-régulation, et augmente la complexité de maintenance.
Interface Mécanique Spécifique	Exige une interface mécanique totalement nouvelle (connectique, format de fixation) pour chaque nouveau système (radio, drone, robot) génère un NRE pour un faible volume.	Empêche l'interopérabilité et la logistique transverse d'énergie.

Un exemple frappant est le profil de vibration : exiger qu'une batterie portative (au profit d'une radio tactique) tienne le choc du tir d'un canon Caesar, simplement parce que les deux systèmes sont régis par la même norme globale, est une sur-spécification majeure qui détruit le concept de légèreté et de volume raisonnable.

Le coût élevé des batteries militaires est une conséquence directe de l'insuffisance de la précision dans la définition des besoins. La technologie de base est disponible ; c'est le processus de spécification et de vérification qui doit être réformé pour maximiser l'efficacité de l'investissement.

Maitriser les coûts sur l'ensemble de la chaîne de valeur est un impératif.

Pour réduire des coûts non-récurrents NRE et fiabiliser l'approvisionnement en énergie des forces armées, les recommandations suivantes sont essentielles :

#### **7.4.3. Systématiser une spécification fine sous 3 axes :**

La batterie très souvent considérée, comme un accessoire appartenant à un système complet est trop souvent soumise aux exigences globales du système et pas à des exigences spécifiques batterie. Le maître d'ouvrage (DGA en France), doit s'attacher à définir un cadre spécifique de qualifications pour les batteries, sous forme un tryptique (norme, méthode, paramètre de test) :

- Norme : Ex: MIL-STD-810H
- Méthode : Ex: 501.6 (Température de fonctionnement élevée)
- Paramètres de Test : Ex: +55°C en fonctionnement, avec un cycle climatique A1 spécifique.

Cette approche garantit que l'intégrateur teste uniquement ce qui a du sens pour l'application, évitant ainsi la sur-spécification et les surcoûts d'études inutiles.

#### 7.4.4. *Standardisation des formats de spécification*

Une accélération de standardisation des besoins énergétiques est nécessaire pour favoriser la réutilisation et l'économie d'échelle sur deux axes :

- définition de design Standards : établir une liste de "design de batteries" standards (puissance, capacité, format) pour les usages les plus courants (fantassin, drone léger, véhicule léger) avec leurs exigences minimales de qualification associées.
- promotion de la transversalité : encourager la réutilisation des designs et qualifications existantes (comme les références existantes en dotation au sein des forces (BB 2590, ALI 142, ALI 502) entre programmes, plutôt que de relancer un cycle NRE de onéreux pour une variation mineure.

En réorientant l'effort des spécifications vers la pertinence opérationnelle plutôt que vers l'exhaustivité normative, les fabricants de batteries de combat pourront améliorer la maîtrise de meilleurs coûts, tout en fournissant des systèmes énergétiques plus légers, plus performants, et plus rapidement disponibles pour les forces.

**Recommandation 2** Sous l'impulsion de la DGA, promouvoir auprès des industriels, l'intégration de batteries de combat au design déjà qualifié dans les systèmes commandés.

## 8. Environnement logistique

### 8.1. *Batteries lithium-ion : adapter la logistique militaire.*

#### 8.1.1. *La révolution du lithium-ion et ses implications logistiques : une rupture logistique structurante.*

L'intégration massive des batteries lithium-ion dans les forces armées constitue l'une des transformations logistiques les plus significatives de la dernière décennie. Cette évolution, d'abord motivée par les gains énergétiques et capacitaires de cette technologie, doit entraîner aujourd'hui une reconfiguration profonde des chaînes de soutien, des infrastructures de stockage et des pratiques de maintenance.

Contrairement à la technologie plomb, qui reposent sur des usages plus ponctuels et autonomes, le lithium-ion s'inscrit dans une logique de gestion continue, fondée sur la surveillance, la qualification et la maintenance prédictive.

#### **Une technologie qui impose une maintenance active**

Le MCO des batteries lithium-ion est fondamentalement différent de celui des technologies plombs. La batterie lithium-ion se distingue des technologies antérieures par la nécessité d'une maintenance régulière. Son maintien en condition opérationnelle (MCO) repose sur trois opérations essentielles : la charge, le cyclage et le diagnostic. Le rôle du BMS (Battery Management System) est déterminant : il surveille les paramètres critiques, équilibre les cellules et garantit la sécurité d'emploi.

Cette maintenance active transforme la logistique militaire selon trois axes :

- elle devient prédictive, grâce aux données issues du BMS ;
- elle repose sur des outils de diagnostic intégrés aux chargeurs ;
- elle nécessite une traçabilité individualisée des batteries.

Ainsi, la batterie n'est plus un consommable mais un objet technique suivi, comparable à un équipement électronique complexe.

Il ne s'agit plus simplement de stocker, mais de gérer activement un parc de batteries pour garantir leur sécurité, leur performance et leur durée de vie. Cette gestion active est la clé pour capitaliser sur les avantages du rechargeable.

#### **Les piliers du MCO : charge, cyclage et contrôle**

Le MCO d'une batterie lithium-ion repose sur des actions régulières de charge et de cyclage. Contrairement aux batteries au plomb, un cyclage périodique est essentiel pour plusieurs raisons. Il permet, premièrement, de recalibrer les indicateurs de charge des batteries intelligentes (via SMBus ou CAN-Bus), assurant une

information fiable pour l'opérateur. Deuxièmement, il maintient l'activité électrochimique et conditionne la batterie à un niveau de charge optimal (inférieur à 30%) pour le transport, conformément aux réglementations internationales (UN).

Le processus de charge est également une étape de contrôle cruciale. En connectant la batterie à un chargeur intelligent, une communication s'établit avec le BMS (Battery Management System) interne. Cette étape permet de "réveiller" la batterie, de vérifier l'ensemble de ses paramètres de sécurité et de détecter d'éventuelles défaillances. Ce dialogue assure à l'opérateur une performance optimale de la batterie adaptée à la mission assignée.

### **Mais des contraintes environnementales nouvelles**

Le stockage des batteries lithium-ion requiert des conditions contrôlées, idéalement entre 5°C et 45°C, pour limiter le vieillissement accéléré. Le transport est également soumis à des réglementations strictes pour les matières dangereuses, impliquant des certifications pour les batteries, des emballages spécifiques et un marquage adéquat. Ces contraintes sont valables universellement, que ce soit en métropole, en régiment ou sur un théâtre d'opérations. Par ailleurs, les infrastructures de stockage doivent être correctement appréhendées et intégrer :

- des systèmes de détection incendie,
- des dispositifs d'extinction adaptés,
- des zones de confinement.

La logistique énergétique devient ainsi une logistique de sécurité, où la prévention des risques occupe une place centrale.

Le MCO des batteries lithium-ion est un processus actif et indispensable qui garantit la sécurité et la performance. Il repose sur un couple batterie-chargeur intelligent et qualifié, permettant des contrôles réguliers, une gestion fine de l'état de charge et une préparation adéquate pour le transport.

## ***8.2. Solutions logistiques***

Pour répondre aux exigences du MCO et soutenir efficacement les forces, une nouvelle infrastructure logistique doit être pensée pour être déployée. Cette infrastructure s'articule autour de deux concepts majeurs : des conteneurs de MCO projetables pour le stockage et la maintenance active et une gamme de chargeurs universels adaptés aux différents échelons d'emploi, du régiment à la section débarquée.

### ***8.2.1. Le concept du conteneur MCO***

La solution privilégiée pour la gestion des batteries au niveau régimentaire ou sur une base opérationnelle avancée (FOB) est le "conteneur MCO batterie". Il s'agit d'un shelter projetable (type conteneur 20 pieds) qui combine deux fonctions essentielles :

- Une zone de stockage : Sécurisée, régulée en température, et équipée de systèmes de détection et d'extinction d'incendie pour maîtriser les risques inhérents aux batteries.
- Une zone atelier : Équipée de baies ou d'armoires de charge de grande capacité, permettant de réaliser le MCO (charge, cyclage, test) sur des centaines de batteries simultanément. Il constitue le premier niveau d'une chaîne logistique modernisée, capable de traiter simultanément entre 100 et 200 batteries.

Ce concept, déjà adopté en Allemagne, aux Pays-Bas, en Suède et partiellement en France (KC MCO et de charge FELIN), s'inscrit dans une dynamique OTAN visant à harmoniser les pratiques de soutien énergétique.



*Battery charging and storage container 2.0 (source : Bren Tronics)*

**Recommandation 3** Étudier dans les armées, l'investissement dans des conteneurs projetables dédiés au stockage sécurisé et à la maintenance (charge, cyclage) des batteries. Ces "ateliers batterie" constituent la pierre angulaire d'une logistique centralisée et sécurisée, que ce soit en métropole ou en opération.

### **8.2.2. Le chargeur universel : un pivot du MCO**

En complément des ateliers fixes, un écosystème de chargeurs mobiles et universels est nécessaire pour couvrir tous les niveaux d'emploi :

- Chargeurs d'atelier (Rack Charger) : Systèmes de grande capacité intégrés dans les conteneurs MCO, capables de gérer des centaines de batteries de types différents.



*Chargeurs de compagnie/section (type ABC) : Solutions transportables (source : BrenTronics)*

### **NOUVELLE GENERATION DE CHARGEUR UNIVERSEL**

- CHARGEUR ABC -



*Chargeurs embarqués : Intégrés dans les véhicules, ils permettent de recharger les batteries des combattants pendant les déplacements, en utilisant le réseau de bord du véhicule (source : BrenTronics)*

## SOLUTIONS DE CHARGE POUR VEHICULES



*Chargeurs individuels portables (type Flex) : Solutions légères pour le combattant débarqué, capables de puiser de l'énergie depuis des sources alternatives (solaire, batterie de véhicule, etc. (source : BrenTronics)*

Les solutions individuelles et portables regroupent l'ensemble des dispositifs permettant au combattant de produire, stocker ou redistribuer de l'énergie directement au niveau de l'opérateur.

- Rugged Auxiliary Charger (RAC) : ce type de chargeur portable robuste permet aux combattants de recharger plusieurs appareils via des sorties standards USB-C.
- Soldier Battery Charger : chargeur robuste et léger pour opérations déployées, capable de « réveiller » des batteries profondément déchargées, d'accepter des entrées AC/DC variées et d'intégrer des fonctions de rétroaction en temps réel pour une gestion optimale.

## FLEX CHARGER CHARGEUR TACTIQUE LÉGER ET PLIABLE



*Chargeur tactique (source : BrenTronics)*

Ces chargeurs jouent un rôle central dans la maintenance des batteries. Ils assurent :

- le cyclage,
- la lecture SMBus/CANBus,
- la détection des défauts,
- la gestion intelligente de la puissance,
- la compatibilité multi-batteries.

Ils deviennent ainsi des outils de qualification énergétique, comparables aux bancs de test utilisés pour les systèmes électroniques.

**L'universalité de ces chargeurs est un point clé**, car elle favorise l'interopérabilité entre les nations et conditionne la résilience énergétique des forces projetées.

Cette universalité doit s'exprimer selon deux dimensions :

- Universalité batteries : compatibilité avec l'ensemble des formats utilisés par l'unité ;
- Universalité sources : capacité à fonctionner sur AC, DC, solaire, pile à combustible ou batterie véhicule.

Ainsi, la mise en place d'une logistique batterie performante repose sur une approche systémique. Elle combine des moyens centralisés et sécurisés (conteneurs MCO) avec un écosystème de chargeurs universels et décentralisés. Cette architecture à plusieurs niveaux garantit que chaque échelon, du régiment au soldat en mission, dispose des moyens adéquats pour maintenir ses batteries en condition opérationnelle.

### **8.2.3. Technologies et conception des systèmes de charge**

La performance de la chaîne logistique batterie, tout autant que le délai de rechargement, dépendent directement de la technologie des chargeurs.

La conception d'un chargeur militaire efficace est un exercice de compromis complexe, visant à équilibrer puissance, robustesse, discrétion et intelligence. Le savoir-faire réside dans la maîtrise de ces différents paramètres pour fournir un outil fiable et adapté aux contraintes opérationnelles.

#### **Le compromis technologique au cœur de la conception**

Un chargeur militaire est le fruit d'un arbitrage permanent entre plusieurs facteurs contradictoires :

- Puissance vs. Volume et Masse : Une puissance élevée permet une charge rapide, mais génère de la chaleur, ce qui impose des solutions de refroidissement (ventilateurs) et augmente le volume et la masse.
- Robustesse vs. Performance : Les contraintes de qualification militaire (poussière, immersion, chocs, CEM) imposent des choix de conception (ex: pas de ventilateur) qui peuvent limiter la puissance ou l'efficacité thermique.
- Discrétion vs. Puissance : Un chargeur puissant a une signature thermique et électromagnétique plus élevée, ce qui peut représenter une vulnérabilité en opération.

#### **L'intelligence au service de l'efficacité : la charge dynamique**

L'atout majeur des chargeurs modernes est leur "intelligence", permise par la communication avec le BMS des batteries (via SMBus/CAN-Bus). Cette communication permet d'implémenter des stratégies de charge dynamique :

- Priorisation : Le chargeur peut décider de terminer la charge des batteries presque pleines, ou au contraire de commencer par les plus vides.
- Optimisation : Il peut distribuer la puissance disponible de manière inégale entre les batteries pour, par exemple, amener l'ensemble du parc à 80% de charge le plus rapidement possible.
- Efficacité : Cette gestion intelligente permet de gagner "10 à 20% d'efficacité supplémentaire ou de rapidité supplémentaire par rapport à une charge bête".

#### **La sécurité et la confiance de l'opérateur**

La charge est une "agression" électrique pour la batterie et représente un risque potentiel d'emballement thermique. Un couple batterie-chargeur qualifié et fonctionnant en synergie est donc le premier élément de sécurité. Il transforme cette contrainte en opportunité : chaque charge devient un test de santé complet de la batterie.

Pour l'opérateur sur le terrain, la simplicité et la fiabilité doivent primer. Une interface simple (codes couleur rouge/jaune/vert) est souvent plus robuste et efficace qu'un écran détaillé. L'objectif final est de donner confiance à l'utilisateur.

Le couple batterie-chargeur est vital pour la réalisation de la mission et l'attention de l'opérateur doit être sur sa mission et pas sur l'état de son équipement.

La conception d'un chargeur militaire performant va bien au-delà de la simple conversion d'énergie. Elle intègre des compromis techniques, des qualifications environnementales strictes, des stratégies de charge intelligentes et une interface utilisateur pensée pour la confiance et la simplicité d'emploi. C'est ce savoir-faire global qui garantit un outil fiable et efficace, essentiel au succès des opérations.

Les évolutions technologiques et les nouveaux concepts d'emploi, notamment la robotique légère, ouvrent la voie à de nouvelles réflexions. L'avenir des systèmes de charge sera dicté par la résolution de la contrainte de la source d'énergie et par l'exploration de nouvelles modalités d'interaction.

#### **La source d'énergie : le principal facteur limitant**

La principale limite à la rapidité et à l'efficacité de la charge en opération n'est pas le chargeur lui-même, mais la disponibilité d'une source d'énergie puissante. La vraie limite reste la source d'énergie, dont la libre disposition reste plus difficile à garantir dans le milieu terrestre que dans le milieu naval ou aérien. Que cette source soit le réseau de bord d'un véhicule, un panneau solaire ou une pile à combustible, sa capacité dicte directement la performance de toute la chaîne de charge.

## **L'évolutivité des chargeurs face aux nouvelles chimies**

Une question importante est la pérennité des investissements dans les KC MCO et chargeurs actuels face à l'arrivée de nouvelles chimies de batteries (ex: sodium-ion). La réponse est rassurante : les chargeurs intelligents et universels sont conçus pour être évolutifs. Grâce à des mises à jour logicielles (firmware), ils peuvent intégrer de nouveaux profils de charge adaptés à n'importe quelle chimie.

La principale contrainte d'adaptation restera physique (la connectique qui conditionnera la compatibilité future des systèmes) et non logicielle. Comme pour le civil, la mise en place de familles de batteries standardisées facilite l'interopérabilité entre plateformes et réduit la complexité des systèmes de charge notamment grâce à une connectique unifiée (USB C) et un mode de communication standardisé (bus I2C par exemple).

Deux tendances émergent :

- la standardisation (USB-C militaire), adoptée par les forces américaines, qui pourrait à terme simplifier ce défi.
- la charge inductive qui reste encore immature pour le combattant débarqué.

### ***8.2.4. Vers le transfert d'énergie entre plateformes - Le véhicule "porte-avions énergétique".***

Une perspective d'avenir majeure est le concept de transfert d'énergie entre différentes plateformes. L'idée est de transformer certains véhicules (ex: un Griffon hybride) en "stations-service" ou "plateformes-mères" énergétiques. Ces véhicules, dotés de grandes réserves d'énergie, pourraient recharger rapidement des systèmes satellites comme des robots (UGV) ou des drones (UAV).

Ce concept résout le problème de la source d'énergie pour les robots, mais déplace le défi vers la rapidité et la méthode de connexion (par induction ou par contact physique automatisé).

L'avenir des systèmes de charge pour le combattant débarqué et ses équipements associés (robots, drones) est prometteur. Si les technologies de chargeurs sont matures et évolutives, l'enjeu principal reste la source d'énergie. Les concepts de transfert d'énergie entre plateformes apparaissent comme une voie d'avenir essentielle pour soutenir l'autonomie des systèmes robotisés sur le champ de bataille.

### ***8.2.5. Spécificités des batteries de véhicules et impact sur la maintenance***

La transition vers le lithium-ion pour les batteries de véhicules (type 6T ou autres) engendre des changements encore plus profonds que pour les batteries débarquées. En raison de leur durée de vie et de leur intelligence embarquée, ces batteries modifient radicalement la doctrine de maintenance et la gestion logistique, passant d'une logique de consommable à celle d'un organe du véhicule

#### **D'un consommable à un organe du véhicule**

La différence fondamentale réside dans la durée de vie. Une batterie au plomb, dans les conditions difficiles d'un théâtre d'opérations, peut être changée tous les 3 à 6 mois. À l'inverse, une batterie lithium-ion est conçue pour durer 5 à 7 ans, réalisant 3000 à 4000 cycles. On passe dans le monde du plomb d'une batterie consommable régulièrement, avec le lithium, à un organe de la plateforme, du véhicule, qu'on remplacera que deux ou trois fois dans la vie du véhicule.

Ce changement a une implication majeure : on passe d'une gestion quantitative de stock à une gestion qualitative et sérialisée et individualisée. Chaque batterie lithium-ion devient un composant sérialisé, dont l'état de santé est suivi en temps réel grâce à son BMS et à sa communication (CAN-Bus) avec la plateforme.

#### **Un bouleversement pour la maintenance et la formation**

Cette nouvelle approche impose de revoir complètement les processus de maintenance et la formation des personnels. La maintenance devient prédictive : au lieu de changer systématiquement les batteries, on les remplace en fonction de leur état de santé réel, communiqué par le système. Les opérations de maintenance elles-mêmes sont simplifiées, en raison du poids et du volume réduits des batteries lithium.

Cependant, ce changement culturel et organisationnel sera un défi majeur. Si les processus sont maîtrisés dans le domaine des batteries du combattant débarqué, les logisticiens et maintenanciers doivent appréhender et former de façon différentes à ces nouveaux outils et à cette nouvelle philosophie de gestion pour les batteries des véhicules.

L'adoption des batteries lithium-ion dans les véhicules est bien plus qu'une simple évolution technique ; c'est un changement de paradigme pour la logistique et la maintenance. Elle promet des gains opérationnels et une

simplification des tâches, mais requiert un investissement significatif dans la révision des processus et la formation des personnels pour que son plein potentiel soit réalisé.

**Recommandation 4** Accompagner les services étatiques dans la définition conceptionnelle et technique d'une nouvelle chaîne logistique pour les batteries de chimies actuelles ou futures

### **8.3. Seconde vie – Recyclage**

#### **8.3.1. Contexte général de la mise en œuvre de la politique durable du MCO-T.**

La politique durable menée par la SIMMT s'inscrit dans un contexte où les armées doivent concilier deux impératifs souvent perçus comme contradictoires : maintenir une capacité opérationnelle maximale tout en intégrant progressivement des pratiques de sobriété énergétique et de développement durable. Elle n'a pas pour objectif premier de « sauver la planète », mais bien de garantir la disponibilité opérationnelle des matériels terrestres. Lorsque des solutions plus sobres, plus circulaires ou moins consommatrices de ressources permettent d'atteindre ce résultat, elles sont adoptées.

#### **8.3.2. Politique de développement durable de la SIMMT**

Une approche pragmatique centrée sur la capacité opérationnelle

La SIMMT ne mène pas une politique environnementale par militantisme, mais par nécessité opérationnelle. Moins consommer de ressources, c'est réduire la dépendance logistique ; réemployer ou valoriser des équipements, c'est accroître la résilience ; optimiser les flux, c'est gagner en réactivité. Cette approche se traduit par une politique structurée autour de la sobriété logistique, de l'optimisation des ressources et de l'innovation.

#### **Réemploi des équipements et pièces détachées**

La SIMMT a mis en place des marchés avec des garagistes et fournisseurs privés permettant d'acquérir des pièces de seconde main, de réemployer des équipements auparavant mis au rebut et de réduire les coûts et les délais d'approvisionnement. Cette démarche fonctionne particulièrement bien pour les véhicules dérivés du civil. Elle est en revanche inapplicable aux matériels lourds pour lesquels il n'existe pas de filière civile de pièces détachées.

#### **Valorisation des déchets ultimes : un enjeu stratégique**

La valorisation des déchets ultimes constitue un axe majeur, avec un projet de récupération de matières rares, critiques et coûteuses. Un projet important est mené avec l'AID et l'EMA : la récupération de matières rares et de terres rares sur des équipements irréparables. L'exemple le plus emblématique est celui du germanium, indispensable aux optiques infrarouges. 95 % de la production mondiale provient de Chine et les prix ont été multipliés par 300. Le projet vise à extraire ce matériau des équipements hors service pour le réinjecter dans la filière industrielle française.

#### **Plans de prélèvement étatiques (*salvage*)**

Face à l'indisponibilité de certaines pièces, la SIMMT pratique le *salvage* : démontage de pièces sur des véhicules très anciens, remise en état et réinstallation sur des matériels encore en service. Cette pratique permet de maintenir en condition des flottes vieillissantes malgré l'arrêt de production de certaines pièces.

#### **Fabrication additive : réduire les flux logistiques**

La SIMMT utilise désormais l'impression 3D pour produire des pièces non critiques, notamment en OPEX. Les avantages sont nombreux : réduction des stocks, diminution des transports, production à la demande, gain de réactivité. Deux conteneurs sont déployés : un pour l'imprimante et un pour les matériaux. Plusieurs milliers de pièces ont déjà été produites.

#### **Smart Revisage : gestion intelligente des batteries**

Le système *Smart Revisage* permet de connaître l'état réel des batteries au plomb stockées, d'éviter les cycles manuels de montage/démontage, de garantir la disponibilité immédiate d'un véhicule stocké et de réduire les remplacements inutiles. Ce système vise à évoluer vers une compatibilité lithium et illustre parfaitement la synergie entre gain opérationnel et bénéfice de durabilité.

### ***8.3.3. Déclinaison de cette politique dans la gestion des batteries des armées françaises***

La gestion du cycle de vie des batteries est un enjeu crucial pour maintenir la capacité opérationnelle. Une réflexion étatique est en cours sur les critères de fin de vie, notamment pour les batteries du système FELIN. Une décision clé concerne la segmentation de l'usage des batteries en fonction de leur état de santé (*State of Health* – SoH).

#### **Batteries terrestres**

- Plomb : robustes, fiables, peu sensibles aux chocs, mais lourdes et limitées.
- Lithium-ion : forte densité énergétique mais risques d'incendie et d'emballement thermique.
- Lithium fer phosphate : technologie d'avenir, plus sûre et durable.
- Lithium primaire : densité inégalée et fiabilité incontestée

#### **Batteries aéronautiques**

Le NiCd reste la norme pour des raisons de sécurité. Le lithium progresse mais demeure limité par les risques d'incendie.

#### **Batteries navales**

- Sous-marins : historiquement plomb, mais évolution vers le lithium.
- Navires de surface : batteries de secours, souvent plomb ou NiCd.
- Défi majeur : maîtrise des emballements thermiques en milieu confiné.

#### **Batteries pour fantassins**

- Batteries modulaires pour radios, jumelles et systèmes de visée. Smart batteries obligatoires selon les normes européennes.

### ***8.3.4. Problèmes rencontrés avec les batteries lithium dans les armées***

Malgré leurs avantages en densité énergétique, les batteries au lithium présentent des défis majeurs dans un environnement militaire. Leur extension impose de maîtriser l'ensemble des risques opérationnels, y compris sur la chaîne logistique.

- Sécurité : incendie, explosion, emballement thermique.
- Sensibilité aux conditions extrêmes : froid, chaleur, vibrations.
- Contraintes logistiques : transport réglementé, infrastructures spécifiques.

### ***8.3.5. Pistes d'innovation et projets en cours***

- Batteries solides : prometteuses mais pas encore disponibles.
- Sodium-ion : alternative moins dépendante des matières critiques.
- Supercondensateurs : déjà intégrés dans certains groupes électrogènes.
- Pile à combustible : démonstrateur de 15 kW testé, projet suivi par la DGA et la STAT.

### ***8.3.6. Processus de retour et de recyclage des batteries***

La fin de vie des batteries est gérée via un processus centralisé. Toutes les batteries usagées, y compris celles rapatriées des OPEX, convergent vers la 14<sup>e</sup> Base de Soutien du Matériel (BSMAT) à Nouâtre. Sur place, un tri est effectué pour identifier les batteries potentiellement réutilisables après recharge et test, et celles destinées au recyclage définitif. Cette centralisation permet d'assurer une expertise technique, de maximiser la réutilisation et de garantir un recyclage conforme via les filières agréées, notamment le marché Pneus-Piles-Batteries (PPB) géré par INEO. Les unités suivent rigoureusement les procédures du « TracDéchets » et du marché PPB pour le conditionnement et l'expédition. La 14<sup>ème</sup> BSMAT joue un rôle de hub logistique et technique essentiel.

Un défi majeur reste la traçabilité complète du parc. La SIMMT souligne la difficulté à connaître le nombre exact de batteries en service et leur état. L'absence de suivi individuel empêche une gestion optimisée des flux et des stocks.

### ***8.3.7. Conclusions***

La SIMMT met en évidence une dynamique forte autour de la durabilité, de la sobriété logistique et de l'innovation énergétique. Les armées terrestres évoluent dans un environnement où les contraintes opérationnelles restent prioritaires, les dépendances stratégiques deviennent critiques, les risques liés au lithium imposent prudence et innovation, et les solutions alternatives progressent mais nécessitent maturation. La SIMMT adopte une

approche pragmatique : réemployer, valoriser, optimiser, innover, tout en garantissant la disponibilité opérationnelle.

## 9. Synthèse – Perspectives

### 9.1. Croisement technologies – applications défense.

L'année 2026 marque une rupture doctrinale majeure : l'énergie n'est plus considérée comme un simple support logistique consommable, mais comme un facteur déterminant de supériorité opérationnelle sur le champ de bataille à l'horizon 2030.

Cette évolution résulte de la convergence entre l'IA embarquée, la robotique autonome, les nouveaux matériaux et la digitalisation du champ de bataille. Le soldat moderne devient une véritable plateforme électronique ambulante, équipée de radios, GPS, capteurs et, bientôt, d'exosquelettes. De même, pour les véhicules, l'énergie ne sert plus uniquement à la mobilité : elle alimente des systèmes critiques tels que la détection, la surveillance, les communications, la guerre électronique ou encore les armements à énergie dirigée.

Dans ce contexte, la performance énergétique ne peut plus se limiter à la batterie. Elle doit être appréhendée comme un système complet et interdépendant intégrant les chargeurs, la gestion thermique, les micro-réseaux tactiques et les capacités de recharge. Cette vision systémique constitue un fil directeur essentiel. L'évolution technologique de l'écosystème batteries doit ainsi permettre de répondre aux nouveaux besoins opérationnels.

#### 9.1.1. Les ruptures technologiques : batteries de nouvelle génération

Batteries tout-solide

Les batteries tout-solide offrent l'espoir d'une sécurité accrue — « une batterie perforée par un éclat ne s'enflamme plus » — et des densités énergétiques de 400 à 500 Wh/kg. Cette technologie est particulièrement adaptée aux applications nécessitant de grandes cellules, notamment sur les plateformes navales, terrestres ou aériennes, plutôt que sur les équipements de petite taille.

Elles requièrent toutefois des chargeurs capables de supporter des tensions plus élevées et d'intégrer des fonctions d'auto-diagnostic. Compte tenu de la taille des cellules, leur emploi privilégié concerne les systèmes embarqués.

Batteries lithium-soufre (Li-S)

Ideales pour les drones et les exosquelettes, les batteries Li-S — encore au stade exploratoire — imposent des profils de charge spécifiques, des chargeurs ultra-légers et une gestion thermique adaptée aux environnements extrêmes.

#### 9.1.2. Les chargeurs : un maillon critique du système énergétique

Le chargeur reste l'un des éléments les plus critiques du système énergétique, même s'il est souvent négligé. Alors que l'OTAN travaille à l'unification des formats de cellules, les chargeurs restent largement non standardisés, entraînant incompatibilités, multiplication des modèles et dépendance à des solutions propriétaires.

Plusieurs contraintes apparaissent :

- Signature thermique et électromagnétique : la charge rapide génère des signatures détectables, augmentant le risque de ciblage.
- Résilience climatique : les chargeurs commerciaux ne suivent pas les exigences militaires.
- Sécurité et emballage thermique : la DGA impose la maîtrise de l'emballage thermique comme prérequis à toute intégration dans un véhicule roulant.

Si la technologie existe, le véritable enjeu réside dans la complexité et le coût de qualification d'un chargeur militaire.

### ***9.1.3. Vers un pilotage intelligent des BMS***

L'évolution des Battery Management Systems (BMS) constitue un point clé de l'équation énergétique. On s'éloigne d'un composant figé pour aller vers un système dynamique et pilotable. Il s'agit de passer d'un BMS protecteur à un BMS intelligent, capable d'informer et d'assister l'opérateur.

Les BMS actuels fonctionnent avec des seuils fixes et ne s'adaptent pas aux situations opérationnelles. Le besoin émergent est celui d'un mode dégradé permettant de contourner certaines protections pour extraire davantage d'énergie. Dans une situation critique, l'opérateur pourrait choisir de dépasser certaines limites pour continuer la mission, même si cela endommage la batterie.

Cette approche nécessite une communication bidirectionnelle enrichie entre la batterie et le système d'arme. Elle est déjà mise en œuvre dans le programme de drones SMDR.

### ***9.1.4. Prospective 2030 : vers un champ de bataille énergétiquement intégré***

L'énergie devient un enjeu central pour les forces terrestres. L'armée de Terre vise la capacité de déployer un corps d'armée d'ici 2030. Or, certaines plateformes, comme le Griffon, montrent déjà leurs limites énergétiques.

#### **La batterie du combattant : une plateforme électronique ambulante**

Le soldat moderne se décrit comme une « plateforme de systèmes électroniques ambulante », équipé de radios, GPS, capteurs et bientôt d'exosquelettes. L'échec partiel du programme FÉLIN, dû à une autonomie insuffisante des batteries de l'époque, sert d'avertissement. Une bonne batterie portable doit être : légère et peu encombrante ; durable dans des conditions extrêmes ; à haute densité énergétique ; modulable, interopérable et standardisée ; sûre ; intelligente, avec un suivi de l'état de charge et de la durée de vie.

#### **La batterie pour véhicule : au-delà de la locomotion**

Pour les véhicules, l'énergie ne sert plus seulement à la mobilité. Elle alimente une multitude de systèmes critiques : détection, surveillance, communication, guerre électronique et armements à énergie dirigée. Les batteries deviennent également des réservoirs d'énergie au profit de sous-systèmes.

L'automatisation et la robotisation futures seront directement limitées par la capacité à fournir et stocker de l'énergie. Cette vision positionne le blindé non plus comme un simple consommateur, mais comme un nœud central dans le réseau énergétique tactique, renforçant l'autonomie et la résilience des forces déployées.

Liées à des besoins énergétiques exponentiels dans le fonctionnement des systèmes terrestres, les batteries à forte capacité et densité énergétique (type Lithium-Ion, NMC,...) qui équipent ou équiperont les matériels militaires jouent un rôle central dans le management et la gestion de l'énergie de ces systèmes.

Si le domaine civil connaît régulièrement des avancées technologiques spectaculaires dans le domaine des batteries : densité énergétique, réduction des temps de recharge..., la transposition de ces technologies dans un environnement militaire nécessite des efforts importants : réduction de la susceptibilité aux agressions, sécurité d'emploi, tenue à des environnements thermiques et vibratoires extrêmes, capacité à résister à des décharges profondes prolongées...

Les orientations proposées sont différentes en fonction des typologies d'emploi : batteries de combat, batteries 24 V et batteries de traction.

S'agissant des batteries de combat (du combattant débarqué au système autonome), leurs évolutions peuvent se décomposer en deux typologies :

- Les batteries des matériels en service : celles-ci doivent rester interchangeables tant sur le plan géométrique qu'électrique. Seule l'évolution des cellules selon les opportunités disponibles sur le marché ou le traitement des obsolescences de l'électronique qu'elles contiennent peuvent être envisagée.
- Les batteries destinées à des équipements en cours de développement : une recherche de standardisation pour en réduire leur diversité est à engager entre les forces, les fournisseurs d'équipements et de batteries sur la base de technologies les mieux adaptées aux contraintes d'emploi.

En ce qui concerne les batteries 24V 6T, un grand pas a été réalisée car celles-ci répondent à la norme MIL-PRF-32565 D. Il est à noter que l'association de batteries de même provenance est recommandée. Toutefois leur panachage est possible en cas de dépannage avec dégradation de la performance globale.

En ce qui concerne les batteries de traction et/ou systèmes de combat lourds (véhicules à propulsion hybride ou électrique) tout est à réaliser sous réserve que celles-ci répondent à minima à un standard dimensionnel afin

d'ouvrir la porte à l'hybridation ou l'électrification en rétrofit de véhicules existants. On peut notamment lister les étapes suivantes :

- Analyse des évaluations en cours (cf. Griffon hybride...)
- Proposer une norme et standard applicables
- Caractériser et évaluer les chimies de différentes provenances et retenir la ou les mieux adaptées
- Rechercher les systèmes de conditionnement et sécurité les plus appropriés
- Développer ou adapter des BMS associés
- Évaluer les concepts étudiés
- Industrialiser les solutions retenues

## ***9.2. Verrous stratégiques à lever.***

L'accélération des ruptures technologiques — batteries de nouvelle génération, BMS intelligents, hybridation, robotisation — ne suffira pas à garantir la supériorité énergétique des forces si elle n'est pas accompagnée d'une transformation structurelle de l'écosystème. Les avancées techniques existent, mais elles se heurtent encore à plusieurs verrous stratégiques qui freinent leur adoption, leur diffusion et leur intégration opérationnelle.

Ces verrous ne relèvent pas uniquement de la technologie : ils touchent à la standardisation, à la qualification, à l'interopérabilité, à la logistique de l'avant, ainsi qu'à la capacité des forces à penser l'énergie comme un système complet, et non comme une juxtaposition de composants. Tant que ces obstacles ne seront pas levés, les armées resteront dépendantes de solutions fragmentées, coûteuses et difficilement soutenables en opérations.

Lever ces verrous constitue désormais une priorité capacitaire : c'est la condition pour disposer d'une architecture énergétique cohérente, résiliente et évolutive, capable de soutenir les besoins exponentiels du champ de bataille 2030.

### ***9.2.1. Standardisations***

La standardisation, plutôt les standardisations (packaging, interfaces, chargeurs, BMS, ...) constituent un levier stratégique majeur pour réduire les coûts, améliorer l'interopérabilité et structurer l'écosystème énergétique (batteries, chargeurs, câbles).

#### **Recommandation 5**

En s'appuyant sur les travaux réalisés aux USA ou en cours à l'OTAN, créer une gamme de batteries standardisées et un guide technique associé. L'objectif est de fournir une référence claire pour les industriels et d'intégrer ces standards dans les futurs cahiers des charges, afin de sortir de la logique de développements spécifiques pour chaque programme

### ***9.2.2. Intégration dans la logistique de l'avant***

La supériorité énergétique des forces armées ne repose plus uniquement sur la performance des batteries, mais sur la capacité à recharger vite, partout, discrètement et en sécurité. La recharge électrique rapide sur le champ de bataille est l'un des plus grands défis logistiques de la guerre moderne.

L'enjeu est de produire et de distribuer, le plus rapidement possible, de l'électricité là où il n'y a pas de réseau civil.

### ***9.2.3. Trois technologies émergent : la charge rapide, la recharge par induction et l'échange de batteries***

Concernant la charge rapide, bien que maîtrisée dans le secteur civil, un consensus se dégage sur sa faible adaptabilité à la ligne de front. Le principal obstacle n'est pas la technologie de la batterie ou du chargeur, mais la disponibilité d'une source d'énergie capable de fournir la puissance requise.

La recharge par induction apparaît pertinente, mais présente encore des verrous technologiques importants liés aux conditions environnementales et à la topologie du terrain d'opération.

Enfin, l'échange de batteries (« hot swapping ») semble la solution la plus pragmatique et la plus mature, en particulier pour les systèmes de faible consommation. Le hot swapping temporisé, où une micro-batterie maintient le système alimenté pendant le changement de la batterie principale, est déjà pris en compte dans certaines architectures modernes.

**Recommandation 6** Lancer un groupe de travail GICAT sur le transfert d'énergie entre plateformes. Cette étude devra explorer les technologies de connexion (induction, contact), s'assurer que le temps de rechargement est compatible avec le concept d'emploi des plateformes, afin de ne pas créer une nouvelle vulnérabilité puis être éclairée par une expérimentation.

Le combattant, comme le véhicule, devient une plateforme énergétique. Cette réalité impose un changement de paradigme : penser l'énergie comme un système d'armes, anticiper les besoins, sécuriser les flux, et garantir la continuité énergétique dans des environnements contestés. Les armées qui réussiront cette transition disposeront d'un avantage décisif sur le champ de bataille 2030.

**Recommandation 7** Généraliser l'emploi de la technologie lithium-ion, considérée comme mature et maîtrisée, dans l'ensemble des véhicules et systèmes militaires.

Il faut désormais arrêter l'attentisme technologique et de capitaliser sur une technologie éprouvée pour répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs. « Les véhicules du XXI<sup>ème</sup> siècle doivent avoir les batteries du XXI<sup>e</sup> siècle » (Général de division (2S) Baudouin, ancien sous-chef plan programme de l'EMAT en 2018.). L'adoption généralisée et immédiate de la technologie lithium-ion devient un impératif. Cette technologie est désormais mature, ses risques sont caractérisés et maîtrisés et son potentiel en constante évolution est essentiel pour les besoins énergétiques croissants du champ de bataille moderne (robotique, drones, systèmes embarqués). Cette orientation implique d'accepter et de gérer les risques associés (sécurité, intégration) et de cesser les débats sur l'opportunité de son déploiement. Elle vise aussi à standardiser les sources d'énergie pour une meilleure interopérabilité et une logistique simplifiée.

#### ***9.2.4. Une refonte complète de l'architecture énergétique***

L'adoption du lithium-ion comme standard n'est pas une simple substitution technologique, mais le point de départ d'une refonte systémique. Ce choix doit entraîner une reconception de l'architecture électrique des véhicules et de toute la chaîne logistique énergétique. Il s'agit de repenser la chaîne énergétique dans sa globalité : production (alternateurs, hybridation), stockage (batteries standardisées), distribution et charge (chargeurs embarqués, solutions pour fantassins). Cette nouvelle architecture doit être évolutive pour intégrer les futures générations de batteries.

**Recommandation 8** Accélérer les expérimentations d'hybridation en cours, élargir la gamme des engins concernés et intégrer les technologies lithium-ion en conception dans les engins en cours de définition.

Les ruptures technologiques sont là, mais elles ne suffiront pas si elles ne s'inscrivent pas dans une architecture cohérente. Le chargeur, le BMS, la gestion thermique, la standardisation et la logistique de l'avant deviennent des enjeux aussi critiques que les plateformes elles-mêmes.

**L'énergie n'est plus seulement un sujet technique :  
c'est un sujet tactique, stratégique et capacitaire.**

## 10. Compléments

### 10.1. Membres du GT

Accuwatt	Jean-Michel Brun
Arquus	François Deloumeau
ASB	Christophe Nicolas
Bren-Tronics	Sylvain Lhuissier (président) Patrice Janvier
CEA	Aymeric Canton
EHP2	Jean-François Nicolino
EMITECH	Alain Guillerm Rodolphe Secher
FEV	Maxime Lamboy Igor Hazanavicius
GICAT	Michel Bouvet (secrétaire) Jean Armand
Hutchinson	Yannick Blecon Laurent Friehe
KNDS France	Laurent Juve Cédric Degoutte
MBDA	Lionel Bourlard
SAFT	Guillaume Deniboire
Williamson	Louis Rigaud

#### Invités permanents

AID	Linda Oukacine
DGA	Bastien Rage
EMA/DIEO	Florian Tomat Germain Ranquet Raphael Danino-Perraud
EMAT/BPlans	Basile Caire Mathieu Lafond

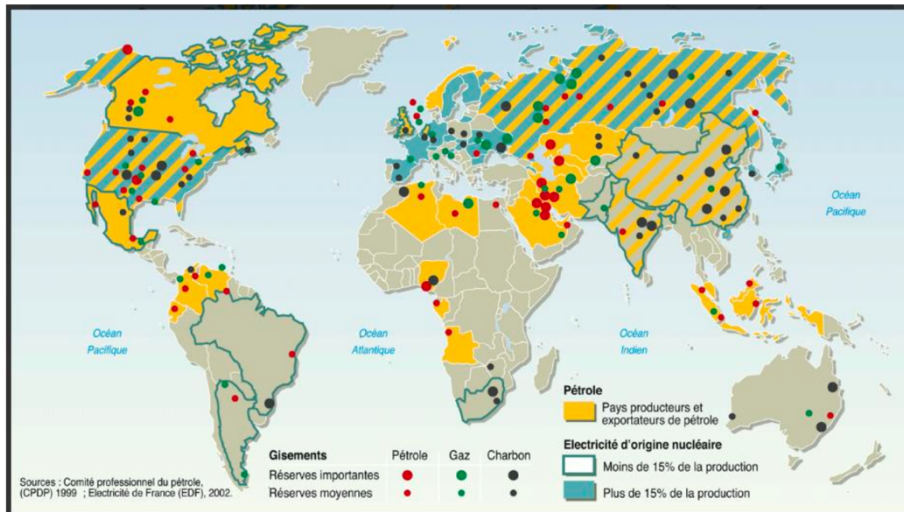
## 10.2. Liste des auditions

17/9/24	Cartographie des besoins en alimentation énergétique vue par la DGA	Bastien Rage	DGA/DIE
17/9/24	Road-map des technologies actuelles et futures des batteries automobiles	Igor Hazavanicus	FEV Consulting
17/9/24	État des lieux des batteries civiles et de défense	Sylvain Lhuissier	Bren-Tronics
15/10/24	Cas des piles	Guillaume Deniboire	SAFT
15/10/24	Perspective du besoin	Lt-Col Basile Caire	EMAT/PP
20/11/24	Solution de charge/décharge	Laurent Juve	KNDS France
20/11/24	Les matières premières	Lt-col Raphael Danino-Perraud	EMA/DIEO
17/12/24	Conception et fabrication de batteries sur mesure	Jean-François Nicolino	eHP2
17/12/24	Cas d'usage : drone de logistique lourde	Damien Chatard	Skydome
17/12/24	Test de qualification de batteries	Alain Guillerm	Emitech
21/01/25	Roadmap « civile » 2030+	Aymeric Canton	CEA
26/02/25	Intégration dans les systèmes	Laurent Juve	KNDS France
11/3/25	Conteneur de stockage d'énergie	Vincent le Quintrec	SAFT
11/03/25	Intégration sur missiles	Antoine Chauvière	MBDA
24/04/25	Militarisation de l'offre civile	Sylvain Lhuissier	Bren-Tronics
24/04/25	Vision robots terrestres	Caroline Senzier	Safran
12/09/25	Échange avec le SGT19 du Pacte drone	Jean-François Nicolino	eHP2
14/10/25	Criticité des matériaux pour batteries	Alice Marie	CEA/LITEN
23/10/25	Gestion thermique des batteries pour les véhicules civils (FEV)	Igor Havazanicus	FEV Consultins
23/10/25	Exploitation du rapport Volta	Aymeric Canton	CEA
01/12/25	Les batteries à la SIMMT	Alexi Petit	SIMMT
25/03/26	Vision "batteries" du SCPP	GB Le Carff	SC Plan Programme

## 10.3. La démarche prospective capacitaire : trois paradoxes énergétiques

La réflexion sur le besoin de l'armée de Terre concernant l'énergie part de la prise de conscience de trois paradoxes énergétiques.

1<sup>er</sup> paradoxe : les pays développés développent des énergies renouvelables partiellement utilisables par les moyens de l'armée de Terre alors que les pays d'intervention sont généralement moins avancés en la matière avec la persistance probable des énergies fossiles.



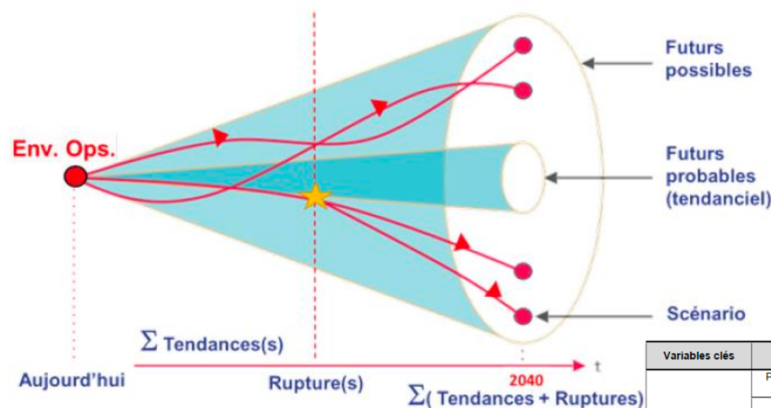
### 1<sup>er</sup> paradoxe

Pays développés = énergies renouvelables partiellement utilisables par nos moyens

Versus

Pays d'intervention généralement moins avancés = persistance probable des énergies fossiles

2<sup>ème</sup> paradoxe : la disponibilité du pétrole et du gaz va diminuer, mais une tendance technologique lourde pourrait advenir et rebattre les cartes



### 2<sup>e</sup> paradoxe

La disponibilité du pétrole et du gaz va diminuer, mais une poursuite des tendances technologique et rebattre les cartes

Variables clés	Tendances de fond identifiées	Principales ruptures [R] et incertitudes associées [I]
Environnement international	Poursuite du réchauffement climatique	[R] Emergence d'énergies renouvelables révolutionnant les transports [R] Accélération de la judiciarisation des sociétés et des rapports entre États
	Poursuite des confrontations stratégiques par compétitions et contestations	[R] Maîtrise de technologies de rupture à fort impact militaire des compétiteurs [I] Modification majeure du système international (disparition ou hégémonie des CI)
	Croissance démographique dans les PED et vieillissement dans les PD	[R] Amplification des déséquilibres démographiques
	Raréfaction de ressources vitales ou stratégiques	[R] Extinction des réservoirs de ressources facilement accessibles ou exploitables

3<sup>ème</sup> paradoxe : Alors qu'il nous est demandé d'être moins consommateurs en énergie pour alléger le poids logistique, il existe une part croissante de besoins en énergie électrique liée à la multiplication des moyens électriques et électroniques employés par les forces et leur environnement.

La question énergétique est bien présente dans la démarche prospective capacitaire de l'armée de Terre visant à préparer l'action terrestre future.

## 10.4. Focus sur la Battery Regulation

Le règlement (UE) 2023/1542 vise à garantir des batteries sûres, durables et traçables dans l'Union européenne.

Même si ce règlement européen fait la part belle à la création d'une économie circulaire en réglementant les batteries tout au long de leur cycle de vie, il précise également que, lors de leur mise sur le marché, elles ne doivent pas présenter de risque pour la santé humaine, la sécurité des personnes, les biens ou l'environnement, l'un des grands principes du marquage CE.

Le règlement est entré en vigueur en 2023 ; toutefois, son application complète est progressive et s'échelonne sur la période 2024-2036.

À titre d'illustration, certaines exigences sont d'ores et déjà applicables :

- Obligation de marquage CE depuis le 18 août 2024 ;
- Obligation relative au symbole de collecte séparée ainsi qu'à la responsabilité élargie du producteur depuis le 18 août 2025.

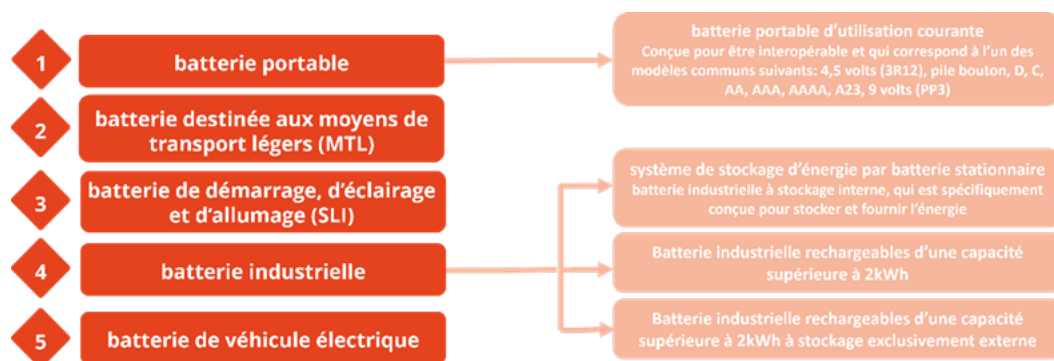
À titre prévisionnel, les exigences suivantes entreront en application :

- Mise en œuvre du code QR et du passeport batterie à compter du 18 février 2027.

Ce règlement se veut applicable à tous les types de batteries, qu'elles soient rechargeables ou non, quels que soient leurs niveaux de tension et leurs caractéristiques chimiques.

Il s'applique également aux batteries qui sont incorporées dans des produits ou ajoutées à ceux-ci ou qui sont spécifiquement conçues pour être incorporées dans des produits.

Il catégorise les batteries en cinq catégories.



Catégories et sous-catégories du règlement (UE) 2023/1542

Ce règlement définit des exigences de conformité qui sont applicables en fonction de leur catégorie.

À ces exigences de conformité viennent s'ajouter des objectifs de collecte pour les batteries usagées ainsi que des obligations de recyclage et de récupération des matériaux (pour le cuivre, le cobalt, le lithium et le nickel), tout en définissant la notion de producteur et sa responsabilité élargie (REP).

Les notions de réemploi, de réaffectation et de remanufacturation sont désormais intégrées afin d'établir les conditions applicables à la seconde vie des batteries ainsi qu'aux modalités de leur remise en service sur le marché de l'Union.

Pour favoriser l'économie circulaire des batteries, certaines informations — notamment sur le contenu recyclé, les performances, la traçabilité et la conception — doivent être mises à disposition de l'utilisateur, du recycleur, des organismes notifiés et des autorités de surveillance. Le passeport batterie permet de centraliser ces informations et d'en organiser l'accès, de façon différenciée, pour les acteurs ayant un intérêt légitime à les consulter et à les exploiter.

Ce passeport sera accessible au format numérique via un code QR, mais cela ne dispense pas d'apposer physiquement le marquage CE sur la batterie.

Article	Description	Portable	MTL	SLI	Industrielle		VE
					≤ 2kWh	> 2kWh	
6	RESTRICTIONS APPLICABLES AUX SUBSTANCES	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	EMPREINTE CARBONE DES BATTERIES		✓			✓	✓
8	CONTENU RECYCLE DES BATTERIES (Co, Pb, Li ou Ni)		✓	✓		✓	✓
9 - 10	EXIGENCES DE PERFORMANCE ET DE DURABILITE	✓	✓			✓	✓
12	SECURITE DES SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE PAR BATTERIE STATIONNAIRE				1		
13	ÉTIQUETAGE ET MARQUAGE DES BATTERIES	✓	✓	✓	✓		✓
14	INFORMATIONS RELATIVES A L'ÉTAT DE SANTE ET A LA DUREE DE VIE PREVUE DES BATTERIES		✓		1		✓
78	PASSEPORT NUMERIQUE DE LA BATTERIE		✓			✓	✓

Procédure d'évaluation module D1 ou module G, intervention d'un organisme notifié obligatoire

Procédure d'évaluation module A ou module D1 ou module G

1 Système de stockage d'énergie par batterie stationnaire (BESS)

### Exigence de conformité, règlement (UE) 2023/1542 en fonction de la catégorie

Même si le règlement ne prévoit des essais de sécurité que pour la catégorie des batteries de stockage d'énergie stationnaire (BESS), l'objectif consistant à ne mettre sur le marché que des batteries ne présentant aucun risque pour la santé humaine, la sécurité des personnes, les biens ou l'environnement doit être pris en compte.

Une analyse et une évaluation appropriées des risques doivent constituer l'étape initiale du processus de mise en conformité d'une batterie. Après détermination des caractéristiques de la batterie (notamment sa catégorie, ses caractéristiques électriques, son environnement d'exploitation ainsi que les contraintes mécaniques, électriques et environnementales applicables), cette analyse doit permettre d'identifier les dangers associés à la batterie, d'estimer les risques correspondants et de définir les mesures de maîtrise nécessaires afin de réduire tout risque jugé non tolérable à un niveau acceptable.

L'application d'une norme, même partielle, constitue un moyen reconnu de réduction des risques. À titre d'exemple, la mise en œuvre des exigences de l'UN38.3 (ou de la CEI 62281) permet de maîtriser les risques associés au transport des batteries.

De la même manière, l'analyse de risques doit permettre de déterminer la nécessité de procéder à une évaluation de la sécurité fonctionnelle d'un circuit de protection (par exemple le BMS), notamment par la détermination d'un niveau PL ou SIL approprié.

L'analyse et l'évaluation des risques doivent être réalisées sur l'ensemble du cycle de vie de la batterie, depuis sa fabrication jusqu'à sa mise au rebut.

Le document d'analyse doit être intégré au dossier technique de construction de la batterie, avec l'ensemble des éléments démontrant la conformité aux exigences du règlement (UE) 2023/1542.

Bien que le règlement (UE) 2023/1542 relatif aux batteries ne s'applique pas aux équipements relevant de la protection des intérêts essentiels de sécurité des États membres, notamment aux armes, aux munitions et au matériel de guerre (à l'exception des produits non spécifiquement destinés à des fins militaires), les exigences qu'il établit ainsi que les méthodes de démonstration associées constituent un cadre harmonisé à l'échelle de l'Union.

Il appartient dès lors au prescripteur de définir, dans les cahiers des charges applicables, les exigences retenues et leur niveau d'application au regard des objectifs du programme.

*Quand l'excellence  
devient **VITALE***



**Groupement des industries  
françaises de défense et de sécurité  
terrestres et aéroterrestres**

39 rue Mstislav Rostropovitch  
75017 Paris  
+33 (0)1 44 14 58 20  
contact@gicat.fr

[gicat.com](http://gicat.com)