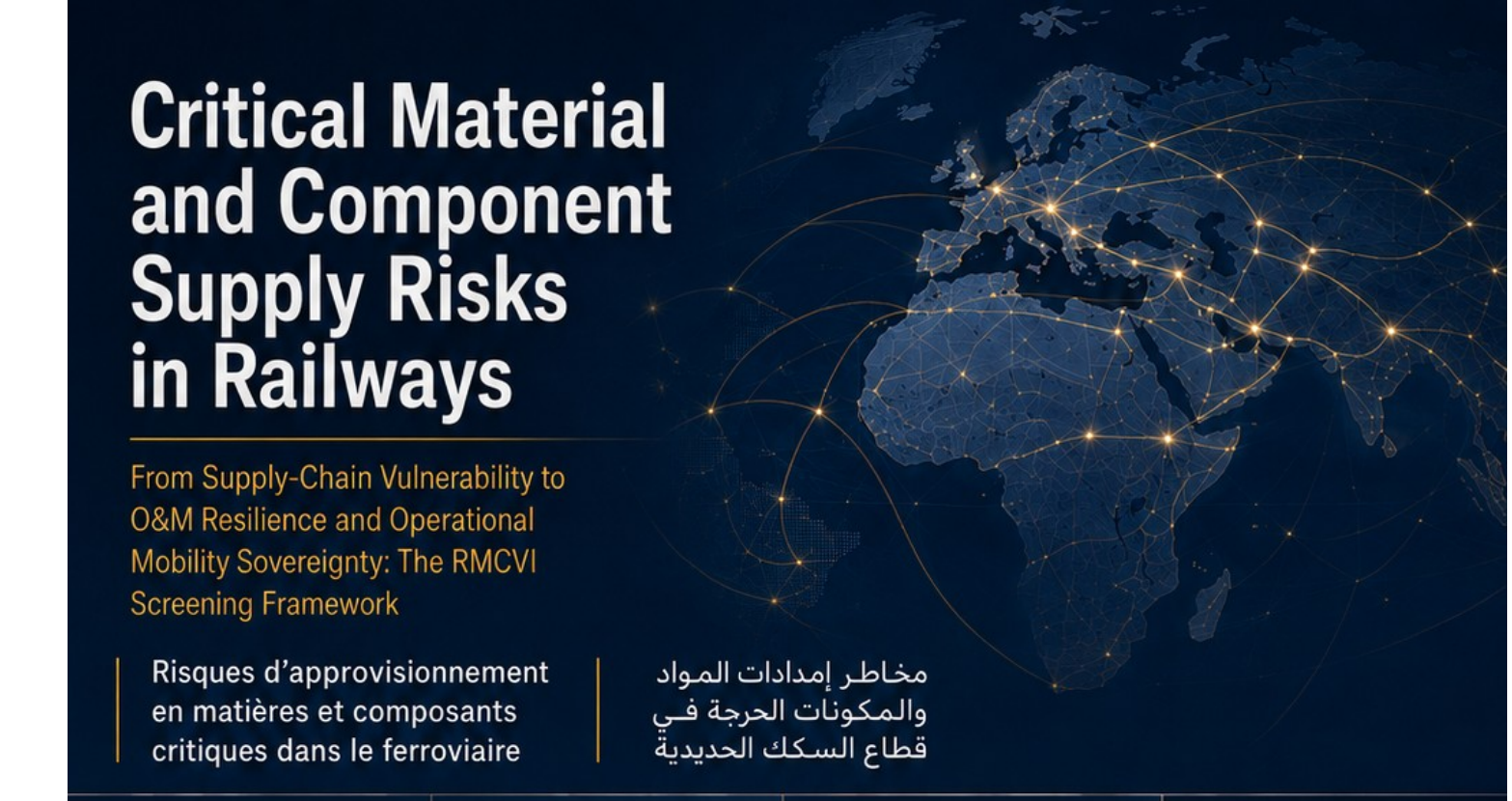
Critical Material and Component Supply Risks in Railways

From Supply-Chain Vulnerability to O&M Resilience and Operational Mobility Sovereignty: The RMCVI Screening Framework

Risques d'approvisionnement en matières et composants critiques dans le ferroviaire

مخاطر إمدادات المواد والمكونات الحرجة في قطاع السكك الحديدية



1 RAW MATERIALS & MINERAL SUPPLY

- COPPER
- GRAPHITE
- RARE EARTH ELEMENTS
- LITHIUM
- SEMICONDUCTORS (SiC)

2 CRITICAL RAILWAY COMPONENTS



- PANTOGRAPH CONTACT STRIP



- TRACTION MOTOR (PERMANENT MAGNETS)



- TRACTION TRANSFORMER



- TRACTION BATTERY



- SiC POWER CONVERTER

3 RAILWAY OPERATIONS & MAINTENANCE

- PREVENTIVE & CORRECTIVE MAINTENANCE
- CONDITION MONITORING



- ASSET MANAGEMENT
- RELIABILITY & PERFORMANCE
- SKILLED WORKFORCE

4 AVAILABILITY & RESILIENCE OUTCOMES

- HIGH AVAILABILITY & RELIABILITY
- ESSENTIAL MOBILITY DELIVERED
- **OPERATIONAL MOBILITY SOVEREIGNTY**
- RESILIENCE TO SHOCKS & DISRUPTIONS

RMCVI

Railway Material & Component Vulnerability Index Screening Framework

Issame Garchali

GI Consulting Mobility & Ecological Innovation (GICMEI)

EN | FR | AR | 27 August 2026 | Version 1.0

DOI: 10.5281/zenodo.22127446

GICMEI
MOBILITY & ECOLOGICAL INNOVATION



**GI CONSULTING MOBILITY &
ECOLOGICAL INNOVATION**

CRITICAL MATERIAL AND COMPONENT SUPPLY RISKS IN RAILWAYS

From Supply-Chain Vulnerability to O&M Resilience and Operational Mobility Sovereignty: The RMCVI Screening Framework

Independent applied-research working paper - English/French/Arabic Edition - Version 1.0 (First trilingual edition)

Issame Garchali
CFO / Traction Power / HV-LV Expert — Operations & Maintenance
27 August 2026
DOI: 10.5281/zenodo.22127446

English reference version. This independent applied-research working paper is intended for professional and exploratory scientific dissemination. Material-to-component relations are sourced; the RMCVI is an original screening framework that remains to be calibrated and validated on industrial data. This version has not undergone peer review.

Publication positioning

Positioning
This independent publication focuses on railway operations and maintenance. It examines how upstream vulnerabilities — raw material, refining, component, supplier, process or technology — can increase recovery time, degrade RAMS performance and disrupt essential mobility functions. The terms “strategic autonomy” and “operational mobility sovereignty” are used in a deliberately narrow sense: the capacity of a country and its operators to sustain critical mobility services without excessive external dependence on non-substitutable supply-chain nodes. This is not an argument for industrial autarky, and it does not imply that every material shortage is a sovereignty threat.

The publication distinguishes three classes of statements: (i) documented facts, (ii) technically reasonable inferences supported by several sources, and (iii) hypotheses requiring validation through bills of materials (BOMs), stocks, lead times and maintenance data. This separation is essential to avoid turning a potential vulnerability into an unsupported claim of “railway shortage”.

Executive summary

Railway electrification, digitalisation and higher performance requirements increase dependence on materials and components whose supply chains may be geographically concentrated, exposed to trade restrictions, or characterised by long substitution and qualification times. The IEA considers that 2025 marked a large-scale materialisation of the economic risks associated with highly concentrated mineral supply chains, and documents sharp price increases across several materials between January 2025 and April 2026 [1].

Railways are directly exposed through several documented chains: carbon/copper in pantograph contact strips [7], rare-earth permanent magnets in some traction motors [6], copper or aluminium in some railway transformers [6], lithium-ion cells in battery trains [8], and silicon-carbide power modules in traction converters [10,13].

This study shifts the unit of analysis from “mineral criticality” to functional-chain criticality: material → processing → component → subsystem → spare part → maintenance → availability → continuity of essential service. It proposes a Railway Material & Component Vulnerability Index (RMCVI) combining upstream supply risk, functional dependency, non-substitutability risk, qualification rigidity and logistics exposure. The RMCVI is neither a standard nor a certification method nor a validated predictive indicator; it is an exploratory screening framework to be calibrated on industrial data.

The central proposition is that a very small mass of material can create a disproportionate operational effect when embedded in a functionally indispensable, single-sourced, difficult-to-substitute and slow-to-qualify component. O&M therefore needs to ask not only when an asset may fail, but whether the operator can obtain, repair or requalify the required part before logistical margins are exhausted. Where the asset supports an essential transport function, the issue becomes one of national resilience and strategic autonomy in mobility [20,24]. This is a conceptual proposition to be tested on industrial data; the paper does not claim a universal quantitative relationship between material mass and operational vulnerability.

Keywords: railway, critical raw materials, supply chain, operations and maintenance, RAMS, availability, obsolescence, spare parts, copper, graphite, rare earths, lithium, SiC, essential services, national resilience, strategic autonomy.

Contents

1. Introduction and research problem

2. State of the art: criticality, resilience, maintenance and strategic autonomy

3. 2025–2026 context: concentration, prices and trade restrictions

4. From material to railway service: causal model

5. Mapping material and component families

6. Railway case studies

7. Proposed RMCVI and strategic interpretation

8. Time dimension: stock coverage vs. recovery time

9. RAMS, availability and life-cycle cost

10. Documentary method and proposed validation protocol

11. Proposed stress scenarios and experimental protocol

12. O&M, contractual and strategic implications

13. Discussion, limitations and research agenda

14. Conclusion

Appendix A — EU list of 34 critical raw materials (2023 assessment; strategic status aligned with Regulation (EU) 2024/1252)

Appendix B — Initial railway screening matrix

References

1. Introduction and research problem

Railway maintenance policies have historically been structured around asset reliability, spare-parts provisioning, preventive and corrective maintenance, maintainability and restoration time. This remains essential, but it implicitly assumes that a compatible part or component can be obtained, repaired or replaced within a reasonable horizon.

That assumption becomes less robust when the industrial chain depends on material refined in a small number of countries, a specialised process, OEM-owned intellectual property, an obsolete electronic component or a lengthy railway qualification process. The risk is no longer only technical: it becomes industrial, logistical, contractual and geopolitical. For essential mobility infrastructure, unmanaged dependency can also affect a country’s ability to sustain service during an external disruption.

The central question is therefore: to what extent can a disruption in the supply of critical materials or components propagate into railway maintainability and operational availability and, where an essential function is affected, into the resilience and strategic autonomy of mobility?

1.1 Research questions

RQ1 — Identification: Which materials and components are actually present in railway subsystems, and with what level of evidence?

RQ2 — Propagation: Through which links can an upstream disruption reach maintenance and then service?

RQ3 — Time: What delay separates a supply shock from an availability shortage in a workshop or infrastructure system?

RQ4 — Amplification: Which factors amplify risk — single sourcing, lead time, low stock, obsolescence, qualification rigidity, poor repairability or OEM dependency?

RQ5 — Resilience and strategic autonomy: Which O&M measures — strategic stock, dual sourcing, redesign, substitution, repair, refurbishment, recycling, data access and contractual clauses — most effectively reduce dependencies capable of affecting an essential service?

1.2 Central proposition

Central proposition
O&M criticality is not proportional to the mass of a material in the system. It results from the combined effects of upstream supply risk, functional indispensability, supplier concentration, non-substitutability, logistics exposure and qualification time. A few grams in a non-substitutable component may therefore be more critical to availability than tonnes of a broadly available material. When the component supports an essential transport function, O&M vulnerability may become a national-resilience issue.

2. State of the art: criticality, resilience, maintenance and strategic autonomy

2.1 Material criticality: macroeconomic approach

The European Union evaluates criticality using dimensions such as economic importance and supply risk, including geographical concentration, governance, import reliance, substitutability and recycling. The 2023 list contains 34 critical raw materials, while the Critical Raw Materials Act identifies strategic raw materials and establishes diversification benchmarks for 2030 [3,4,20].

The IEA applies a related approach to energy and strategic technologies, considering supply concentration, supply-demand balance, trade restrictions, substitutability and sectoral importance. Its 2026 Outlook states that concentration risks moved from theoretical vulnerability to immediate economic-security concerns in 2025 [1].

The U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2026 is used as an independent cross-check for current mineral-production and reserve context; it is not the source of the IEA price or 2035 supply-balance projections used in this paper [5].

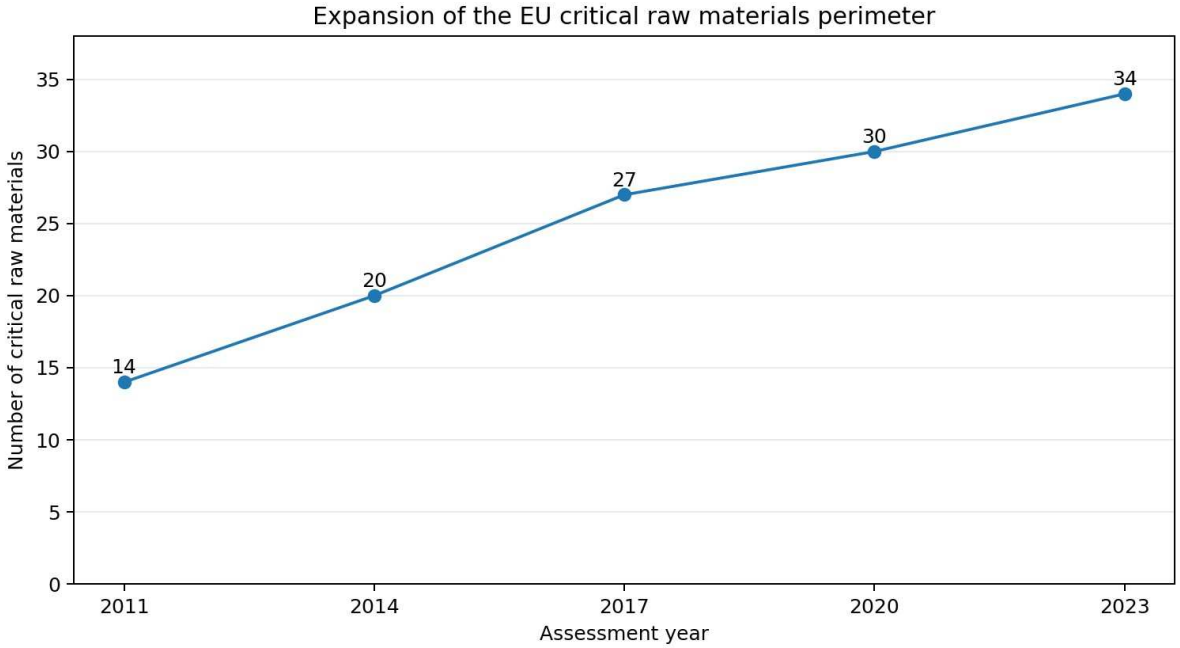


Figure 1 — Expansion of the EU critical raw materials perimeter

Traceability: JRC-RMIS / European Commission CRM lists for 2011, 2014, 2017, 2020 and 2023 [4]. Raw values used: 14, 20, 27, 30 and 34 materials/families. Author-reconstructed time series; no price data or estimate introduced. Accessed 25 August 2026.

2.2 Existing railway work on dependencies and autonomy

Several European initiatives have already identified rail-sector dependencies on raw materials, components and critical technologies. LEADER 2030 (Learnings for European Autonomy to Deliver Europe's Rail in 2030), funded under Europe's Rail Joint Undertaking, maps supply disruptions, 2030 technology needs and raw-material autonomy, bottlenecks and gaps [25]. Its final conference was held at the European Parliament on 8 April 2026; ERCI published the conference report on 17 April 2026, explicitly connecting supply risks, resilience and strategic autonomy in European rail [26].

An information note dated 5 June 2026, submitted by Austria, Croatia, France, Germany, Greece, Italy, Luxembourg, Poland, Portugal and Romania for the AOB item of the Transport, Telecommunications and Energy Council meeting of 8 June 2026, describes the European railway industry as a strategic asset and links rail resilience with transport sovereignty, critical-infrastructure resilience and strategic autonomy, while calling for analysis of critical dependencies [27]. It is an information note from those Member States, not a position formally adopted by the Council.

Contribution positioning: this publication therefore does not claim to discover rail dependence on critical materials. Its proposed contribution is the O&M-oriented formalisation of the causal chain — material → component → maintenance → MDT/availability → essential service — together with the exploratory RMCVI screening framework.

Geographical scope: the regulatory evidence and much of the industrial evidence used in this version are European, complemented by Japanese industrial sources. The framework is intended to be transferable beyond Europe, but no universal applicability is claimed without recalibration against local regulation, supplier structures, fleet technologies, maintenance practices and geopolitical dependencies.

2.3 Limits of the macroeconomic approach for railway O&M

A material can be critical to the European economy but immaterial to a particular railway operator; conversely, a railway component can be operationally critical even if none of its materials crosses a macroeconomic threshold. The relevant unit for O&M is therefore the component-function pair and its associated substitution, repair and qualification chain.

This reasoning is consistent with capital-goods spare-parts literature, which separates demand, repair, inventories and downtime risk, and with railway obsolescence research highlighting the specific challenges of long-life electrical and electronic assets [14,15].

Three terms are distinguished throughout this paper: risk = the likelihood/plausibility of disruption combined with consequence; vulnerability = sensitivity of a chain or system to that disruption; criticality = the importance of the component or function to the system. The RMCVI primarily measures supply-chain vulnerability; it is not a complete risk metric because occurrence probability is not explicitly included.

2.4 RAMS, logistics support and supply chain

A supply disruption does not necessarily change the intrinsic MTBF of an installed asset. Its main effect may be to increase the downtime following failure by extending procurement, logistics, repair or requalification time.

MDT = Tdiagnosis + Tmaintenance + Tlogistics + Tadministrative + Treturn-to-service

The proposed framework therefore inserts supply-chain constraints into Mean Down Time (MDT). EN 50126-1, in the applicable national edition, provides the generic railway RAMS life-cycle framework [22]; it is not a method for assessing raw-material criticality. Here, supply constraints are treated as an external support constraint that can worsen maintainability and availability by extending access to spares, repair capability, logistics resources or qualification of an alternative, without necessarily changing intrinsic MTBF. The British edition BS EN 50126-1:2017+A1:2024 is cited as a documentary reference, not as a universal contractual requirement.

As an applied railway example, the Crossrail Learning Legacy shows how RAMS requirements, performance modelling and supplier RAM delivery were integrated across a major railway programme; it is cited here as practice-oriented context rather than as a raw-material criticality method [19].

2.5 Essential mobility, national resilience and operational sovereignty

Directive (EU) 2022/2557 on the resilience of critical entities treats transport as an essential sector and explicitly includes railway infrastructure managers, railway undertakings and service-facility operators [24]. Railways therefore cannot be analysed solely as an industrial market: in many systems they support vital societal and economic functions.

In parallel, Regulation (EU) 2024/1252 seeks secure, resilient and sustainable access to critical raw materials and expressly links this policy to the Union's economic resilience and open strategic autonomy [20]. These two legal frameworks do not prove that a mineral shortage automatically damages national sovereignty; they do establish that supply resilience and continuity of critical services belong to the same broader economic-security problem.

In this publication, "operational mobility sovereignty" means the ability of a country, transport authorities and operators to sustain essential transport functions despite external disruption, without excessive dependence on a non-substitutable component, supplier, technology or repair capability. The concept is about risk control, diversification, repairability, strategic stock and industrial support capacity — not autarky. The expression is an author-defined analytical framing for this working paper, not a standardised or empirically validated construct.

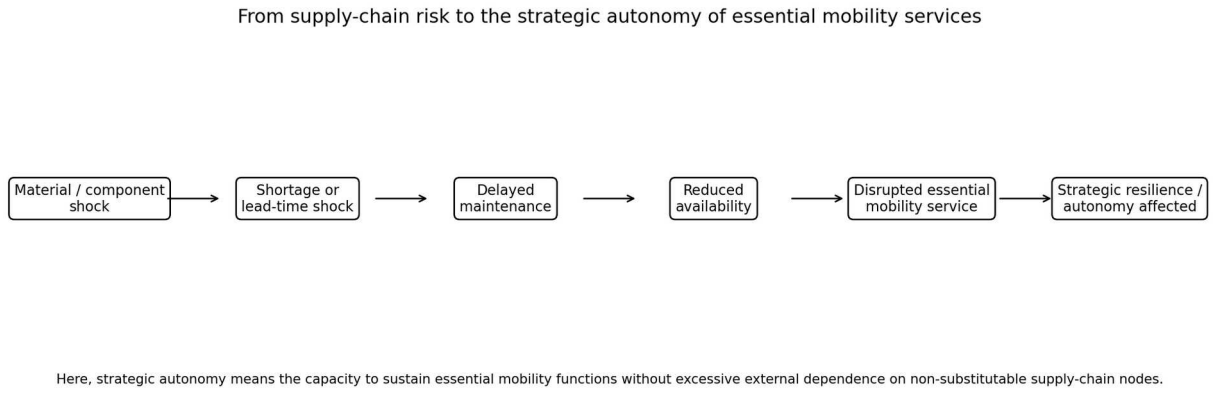


Figure 6 — From supply-chain risk to strategic autonomy in essential mobility services

Traceability: author conceptual model articulated with Directive (EU) 2022/2557 [24], Regulation (EU) 2024/1252 [20], LEADER 2030 [25,26] and the Council note of 5 June 2026 [27]. No quantitative raw data.

3. 2025–2026 context: concentration, prices and restrictions

3.1 Price rebound

Between January 2025 and April 2026, the IEA reports that prices for base metals such as aluminium, copper and tin rose by roughly one-third. Lithium prices more than doubled, cobalt rose by around 130%, and tungsten increased sixfold. European prices for gallium and the heavy rare earths dysprosium and terbium were around five times Chinese domestic prices [1].

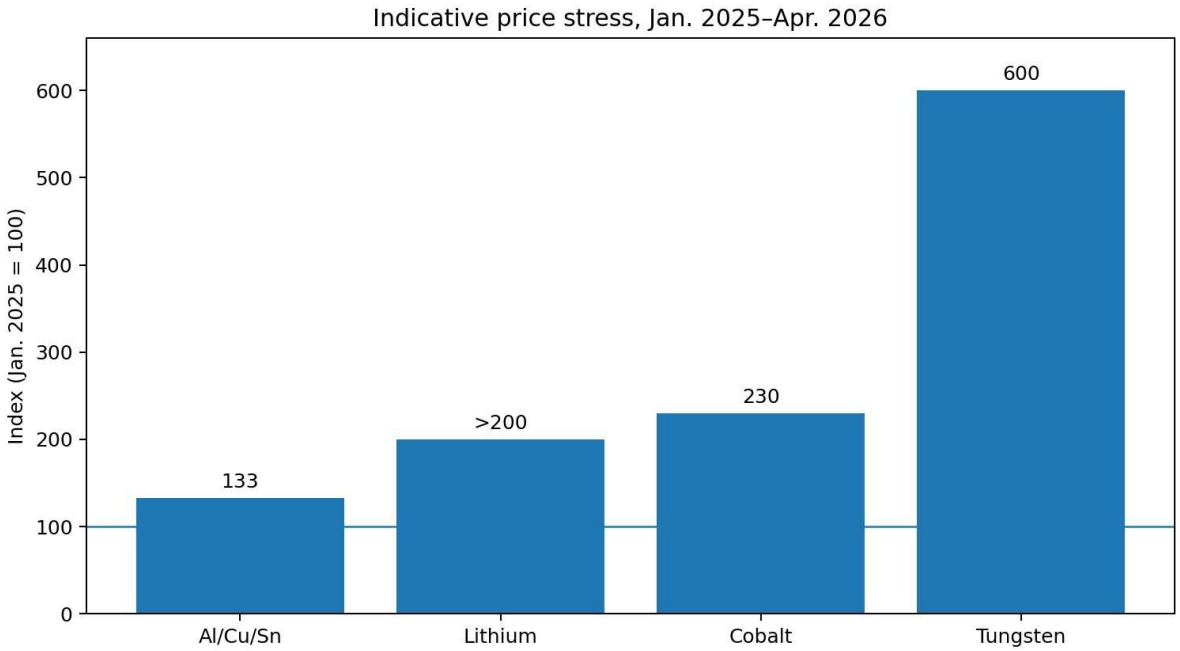


Figure 2 — Indicative price stress observed in 2025–early 2026

Traceability: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2026, Executive Summary, chart “Price developments for selected critical minerals by category, January 2023–April 2026” [1]. Textual changes used: base metals about +33%; lithium more than doubled; cobalt about +130%; tungsten ×6. Method: author-reconstructed variation index with January 2025 = 100 (133; ≥200; 230; 600). These are indices/factors of change, not absolute prices. Accessed 25 August 2026.

3.2 Refining concentration

Concentration is not limited to mining. Excluding rare earths, the IEA reports that the average share of the leading refining country rose from 70% in 2023 to 72% in 2025. For manganese, nickel and graphite, virtually all recent growth in refined supply came from the dominant supplier [1].

At another level of aggregation, the IEA’s 2025 edition reported that the average combined share of the top three refining countries for copper, lithium, nickel, cobalt, graphite and rare earths rose from about 82% in 2020 to 86% in 2024 [21]. These indicators are not interchangeable.

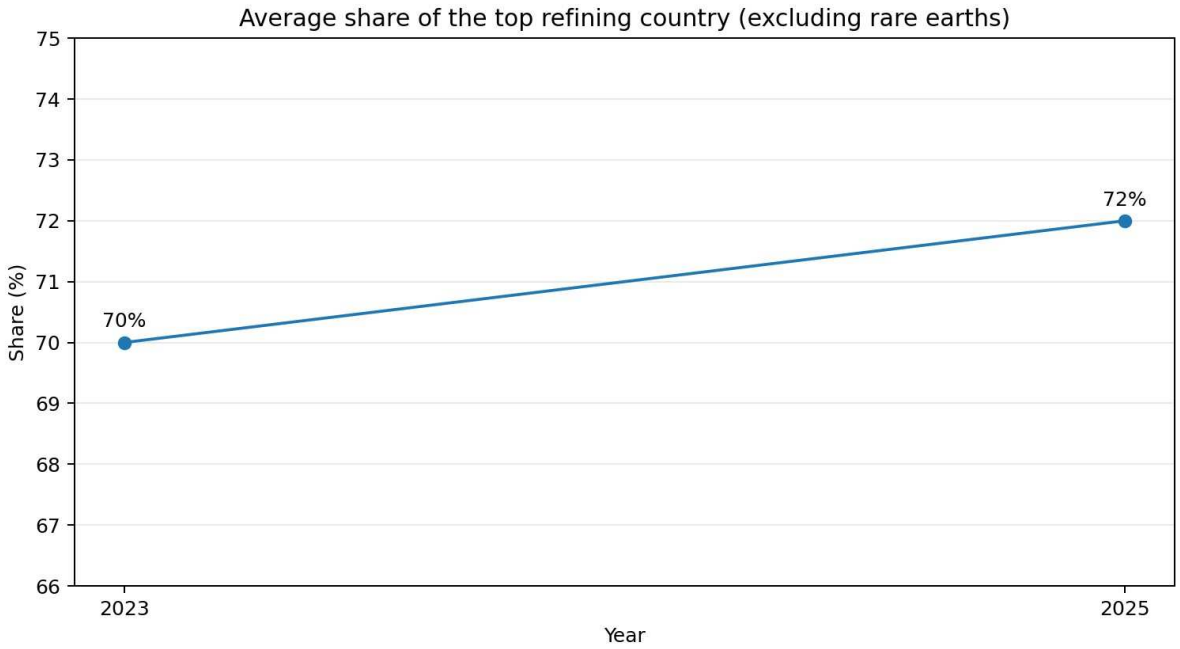


Figure 3 — Average share of the leading refining country

Traceability: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2026, Executive Summary [1]. Raw values: average share of the leading refining country excluding rare earths, 70% in 2023 and 72% in 2025. Author reconstruction; distinct from the combined share of the top three countries. Accessed 25 August 2026.

3.3 European regulatory response

The Critical Raw Materials Act sets 2030 benchmarks of at least 10% of annual EU consumption from EU extraction, 40% from EU processing and 25% from recycling, while aiming to limit dependence on any single third country to no more than 65% at a relevant processing stage [3,20].

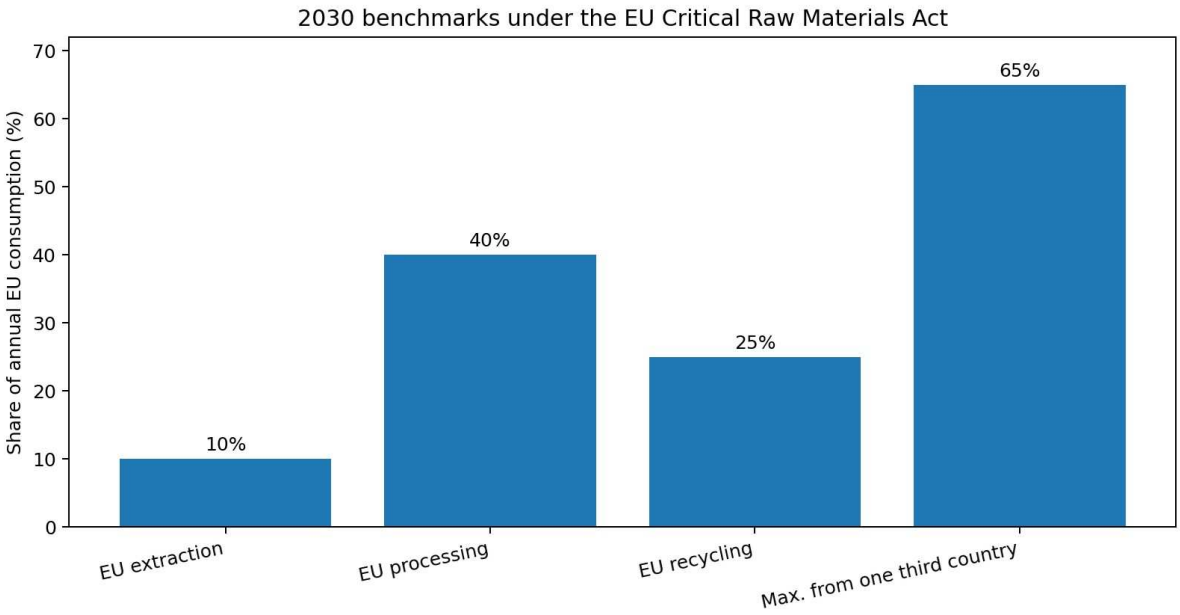


Figure 4 — 2030 benchmarks under the EU Critical Raw Materials Act

Traceability: Regulation (EU) 2024/1252, Article 5 [20]. Raw regulatory thresholds: EU extraction 10%, EU processing 40%, EU recycling 25%, maximum reliance on one third country 65%. Author reconstruction. EUR-Lex accessed 25 August 2026.

3.4 Copper outlook

Copper is especially relevant to railway traction power and electrical systems. In its central case, the IEA still projects an approximately 25% gap in 2035 between expected supply from announced projects and primary supply requirements [1]. This does not mean an automatic railway shortage; it does indicate a structural pressure relevant to investment, heavy repairs, transformers, cables and electrical machines.

4. From material to railway service: causal model

Two shortcuts must be avoided: (1) inferring railway risk from the criticality of a mineral alone; and (2) inferring a spare-part shortage from a price increase. The complete propagation chain must be demonstrated.

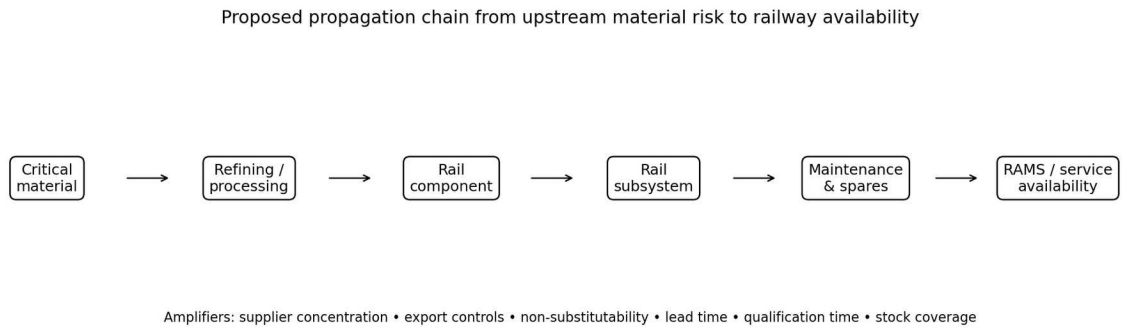


Figure 5 — Proposed propagation chain from upstream risk to railway availability

Traceability: author conceptual model. No quantitative raw data; methodological diagram, not an empirical result.

4.1 Levels of analysis

L0 — Material: extraction and primary availability.

L1 — Refining / processing: purification, metallurgy and advanced materials.

L2 — Component: magnet, carbon strip, battery cell, SiC module, conductor, winding, etc.

L3 — Subsystem: pantograph, motor, converter, transformer, battery, signalling, etc.

L4 — Maintenance: stock, repair, replacement, requalification and obsolescence.

L5 — Service: train, installation or transport-capacity unavailability.

L6 — Strategic resilience: where the service is essential, assessment of effects on mobility continuity, associated economic functions and operational autonomy under external dependence.

4.2 Evidence scale

Level	Definition	Use in this study
E3 — Direct	Primary railway source or scientific publication explicitly establishing the use.	Supports a firm conclusion on presence/use.
E2 — Strong	Technology is well established in rail, but exact composition depends on product.	Conclusion at technology-family level; caution on exact material.
E1 — To verify	Plausible link through electronics, alloy or generic BOM.	Do not conclude without BOM or material data sheet.
E0 — Not established	Insufficient evidence within the reviewed	Excluded from conclusions; retained as a

	perimeter.	research question.

5. Mapping material and component families

The initial screening separates materials with a directly documented railway link from those that can only be confirmed through product-specific BOMs. This avoids automatically placing every EU critical raw material “inside a train”.

Material / family	Candidate railway link	Evidence	Methodological caution
Carbon / carbon grades	Pantograph strips; 3rd-rail shoes	E3	Exact formulation and natural/synthetic graphite origin must be established grade by grade.
Copper	Impregnated strips, cables, windings, transformers, conductors	E3	Price/volume exposure; partial substitution depends on architecture.
Aluminium	Carriers, structures, conductors/transformers depending on design	E3/E2	Can substitute copper in documented applications, subject to engineering.
Nd / Pr / Dy / Tb	Permanent magnets in some traction motors	E3	Highly concentrated refining and magnet-manufacturing chain.
Lithium	Li-ion cells in battery/hybrid trains	E3	Criticality depends on cell chemistry and pack replacement strategy.
Nickel / cobalt / manganese	Some Li-ion chemistries	E2	Do not generalise without cell chemistry.
Natural / synthetic graphite	Battery anodes; carbon materials depending on process	E2/E1	Pantograph carbon feedstock must be demonstrated.
Silicon / SiC	Power modules and traction converters	E3 for SiC	Bottleneck may sit at wafer/module/packaging level rather than mineral.
Ga / Ge / In / Ta / Sn	Advanced electronics depending on BOM	E1	Require BOM and manufacturer evidence.
W / V / Nb / Ti	Alloys and specialised components depending on grade	E1	Verify material grade and supplier specification.
PGMs	Potential specialised applications	E0/E1	No generic railway claim in this version.

6. Railway case studies

6.1 Case A — Pantograph contact strip

Mersen documents railway contact strips in carbon materials, including plain and copper-impregnated grades, with carriers that may be aluminium, copper or steel and copper-impregnation optimisation for high-current applications [7]. Recent tribological research confirms that carbon-strip wear is directly relevant to railway O&M [11].

Correction of a common shortcut
It would be scientifically incorrect to write “natural graphite shortage = pantograph-strip shortage”. The chain must be demonstrated: carbon grade → feedstock → manufacturing process → supplier → network qualification. The word “carbon” alone does not establish whether natural or synthetic graphite is used.

O&M perspective: the strip is an indispensable consumable. Its vulnerability depends on mileage consumption, safety stock, the number of approved grades, qualification time for a new supplier and the possibility of temporary operational mitigation.

Material reading of the pantograph case — avoid the automatic equation “carbon = natural graphite”.

Level	Example / interpretation	Evidence required
Finished product	Pantograph contact strip	Product reference / network approval
Material family	Carbon; carbon-copper depending on grade	Manufacturer technical data sheet
Possible constituents	Natural or synthetic graphite, coke, binder/resin, copper, depending on formulation	Material data sheet, formulation or supplier certificate
Permitted conclusion	Depends on the exact approved grade	Do not infer natural-graphite dependence from the word

		“carbon” alone

Resilience also depends on industrial support depth. Mersen states that it can propose the spare parts required for preventive and corrective maintenance for more than 15 years [23]. This is a supplier-support horizon, not a general guarantee that every feedstock or carbon grade will remain available.

6.2 Case B — Rare earths and traction motors

The IEA estimates that in 2024 China accounted for about 60% of mined magnet rare earths, 91% of refining and 94% of sintered permanent-magnet production [2]. Export controls introduced in April 2025 caused supply difficulties in downstream industries [2].

High-performance NdFeB magnets are mainly based on neodymium and praseodymium and may use dysprosium and terbium to improve high-temperature coercivity and performance [2]. A restriction on a heavy rare earth can therefore affect magnet availability even when neodymium itself is available.

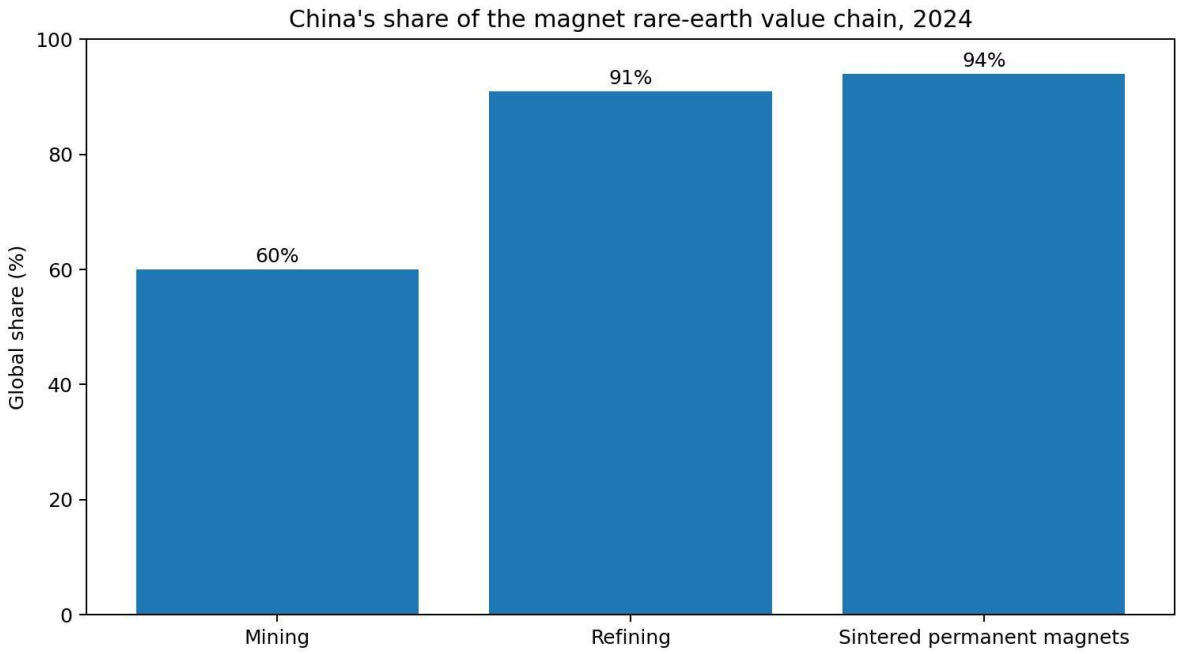


Figure 7 — Concentration of the magnet rare-earth value chain in 2024

Traceability: IEA, Rare Earth Elements, Executive Summary, 2026 [2]. Raw values used: China ≈60% of mining of magnet rare earths, 91% of refining and 94% of sintered permanent-magnet production in 2024. Author reconstruction. Accessed 25 August 2026.

Alstom directly confirms the railway link, stating that rare-earth magnets are used in some traction motors and that it is studying technologies that limit permanent-magnet use [6]. A 2022 review of railway traction-motor topologies provides broader technical context on permanent-magnet and reluctance-machine architectures for distributed traction [12]. Mitsubishi Electric provides a relevant alternative architecture: SynTRACS uses a synchronous reluctance motor whose rotor contains neither permanent magnets nor rare earths; commercial production began during the fiscal year ended March 2025 [9].

This illustrates that resilience can be improved at product-architecture level. For an existing fleet, however, an operator cannot replace a motor or rotor technology without redesign, system validation and potentially new authorisation or certification.

6.3 Case C — Copper, transformers and traction power

Alstom explicitly links rising copper prices to railway components such as transformers and reports transformer designs that can use aluminium instead of copper [6]. This is direct evidence that material-supply conditions are already influencing railway engineering choices.

For the operator, ex-post substitution remains subject to electrical, thermal, mechanical and documentary compatibility. O&M risk therefore lies not only in spot copper prices, but in the capacity to repair windings, procure cables and support long-cycle heavy electrical assets.

6.4 Case D — Lithium-ion batteries

Hitachi Rail documents modular lithium-ion cells in battery and hybrid trains [8]. Material exposure depends on chemistry: lithium-ion batteries do not all use the same quantities of nickel, cobalt or manganese. Analysis must therefore reach the level of cell chemistry, cell manufacturer and pack architecture.

O&M exposure includes availability of compatible cells, BMS constraints, calendar ageing, pack replacement, transport and storage rules, repairability, recycling and long-term support across multiple generations of battery technology.

6.5 Case E — SiC and power electronics

Europe’s Rail documents traction-system demonstrators using 3.3 kV / 800 A silicon-carbide power modules and SiC traction converters [10]. Scientific literature also describes all-SiC converters for light-rail applications [13].

This case shows why “raw material” is an insufficient unit of analysis. The bottleneck may be the high-purity material, wafer, semiconductor fabrication process, high-power packaging, module manufacturer or railway qualification. The study must therefore encompass critical components as well as raw materials.

7. Proposed Railway Material & Component Vulnerability Index (RMCVI)

The RMCVI is proposed as an exploratory screening framework for ranking maintenance vulnerabilities. It is not a standard, certification method or validated predictive indicator. Its scientific value depends on empirical validation, transparent weighting and calibration on industrial cases.

In this version, safety, availability, transport-capacity and regulatory/certification consequences are incorporated into D — Functional Dependency to keep the model parsimonious and reduce double counting.

Dimension	Operational definition
U — Upstream Supply Risk	Mining/refining concentration, export restrictions, supply-demand balance, governance and regional exposure.
D — Functional Dependency	Indispensability to the railway function; consequences for availability, safety, transport capacity, degraded mode, essential-service continuity and regulatory/certification constraints.
NS — Non-Substitutability Risk	Risk arising from the absence, immaturity or non-qualification of an alternative material, supplier or technology.
Q — Qualification Rigidity	Time, tests, authorisation, safety demonstration, compatibility and documentation required before substitution.
L — Logistics Exposure	Lead time, single sourcing, supply-chain depth, repair capacity and available stock.

$$RMCVI = 100 \times (w_U \cdot U + w_D \cdot D + w_{NS} \cdot NS + w_Q \cdot Q + w_L \cdot L), \text{ with } \Sigma w_i = 1$$

U, D, NS, Q and L are first scored on an ordinal 0–3 scale, then normalised as $X_{normalised} = X_{score} / 3$ before weighting. Weights must not be chosen for convenience: a Delphi process can stabilise the criteria and AHP can formalise pairwise comparisons and consistency checks [16,17]. The dimensions are not assumed to be statistically independent; validation should test correlations and possible double counting, particularly between D, NS and Q. No universal “high vulnerability” threshold is claimed at this stage. Because the 0–3

ratings are ordinal screening categories, their weighted aggregation is a pragmatic heuristic rather than an interval-scale measurement. The resulting index should be used for comparative screening and sensitivity analysis, not interpreted as a physically measured quantity or as a precise cardinal distance between components.

The aggregate score must be interpreted alongside a separate Operational Impact output covering safety, availability, transport capacity, regulatory/certification consequences and the essential-service character of the function. A highly vulnerable chain may therefore have limited operational consequence, while a medium vulnerability can affect a function with very high consequence.

7.1 Illustrative scoring grid to be validated

Score	U — upstream	D — functional dependency	NS — non-substitutability	Q — qualification	L — logistics
0	Diversified; no material restriction	Non-critical function; negligible safety/availability/essential-service impact	Immediate qualified alternative	No requalification	Multi-source; high stock
1	Moderate concentration	Limited impact; robust degraded mode; service continuity preserved	Qualified alternative available	Short documentary validation	Low lead time
2	High concentration	Significant availability/capacity, certification or essential-service impact; limited degraded mode	Known alternative not yet qualified	Significant testing/validation	Medium lead time / partial single source
3	Very high concentration / restrictions	Indispensable function; safety issue, major downtime or essential-service interruption; no acceptable degraded mode	No mature or short-term qualifiable alternative	Redesign or heavy authorisation	Single source; low stock coverage
Important					
This scale is a proposed protocol, not a result. Thresholds require calibration on real cases and sensitivity analysis.					

7.2 Worked calculation — illustrative only

To demonstrate the arithmetic without presenting unsupported industrial scores, consider a hypothetical component with provisional scores U=3, D=3, NS=2, Q=2 and L=3 and equal weights w=0.20, adopted here solely for didactic purposes and without pre-empting future Delphi/AHP weighting. After normalisation, the values are 1.00, 1.00, 0.67, 0.67 and 1.00; the resulting RMCVI is 86.7/100. This is a didactic calculation only: it is not assigned to a pantograph strip, traction magnet or SiC module and is not an empirical result.

For the three case-study families below, the current documentary evidence is sufficient to define the component–material chain but not to publish a defensible RMCVI score. The missing industrial data are therefore made explicit instead of being invented.

Case-study family	Documented in this paper	Missing before a defensible RMCVI score
Pantograph contact strip	Carbon/copper grades; wear relevance; long-term supplier-support statement	Approved grade/formulation; qualified-source count; stock; lead time; qualification duration; repair/substitution options
Permanent-magnet traction motor	Rare-earth magnet use in some traction motors; upstream concentration; alternative motor architecture exists	Exact magnet composition; motor/rotor spare policy; supplier topology; stock; lead time; redesign and re-authorisation duration
SiC traction converter	Railway use of 3.3 kV / 800 A SiC modules and all-SiC converter technology	Exact module/BOM; qualified suppliers; repairability; stock; lead time; substitution and qualification constraints

7.3 From RMCVI to strategic consequence

The RMCVI intentionally remains an O&M vulnerability index; it does not measure the sovereignty of a state. After scoring, a second qualitative assessment should determine whether the component supports an essential mobility function, whether redundancy and degraded modes can absorb the shock, and whether repair, substitution or supply can be mobilised within a time compatible with service continuity.

This separation prevents overstatement: a highly vulnerable material may have no strategic consequence for a given network, while a low-cost component used in tiny quantities can become strategically important if its absence immobilises a critical railway function for longer than the available resilience buffers.

8. Time dimension: stock coverage vs. recovery time

A network does not necessarily become unavailable on the day a mine, refiner or exporter is disrupted. Between the upstream shock and operational impact lie material inventories, finished components, OEM stock, operator stock, repair options and substitution strategies. Time must therefore be modelled explicitly.

Stock coverage (months) = usable stock / average monthly consumption

T_recovery = T_procurement + T_industrialisation + T_qualification + T_installation

High-vulnerability condition: T_recovery > T_stock_coverage

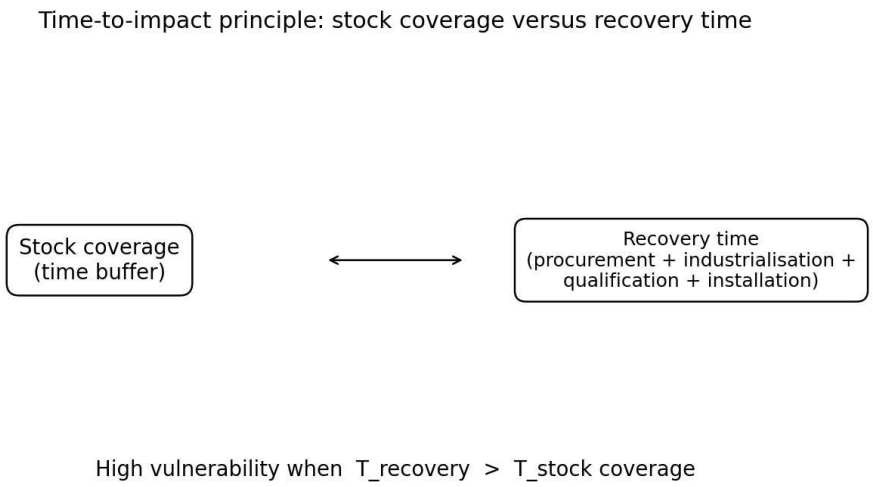


Figure 8 — Principle of comparing stock coverage with recovery time

Traceability: author conceptual diagram. No observed values. T_recovery > T_stock coverage is a screening condition for regular-use items and does not replace probabilistic modelling of slow-moving or repairable critical spares.

For very slow-moving parts, average consumption is insufficient. The framework therefore distinguishes two regimes: (1) regularly consumed items, for which stock coverage is meaningful; and (2) insurance spares, critical repairables and slow movers, for which analysis should incorporate failure probability, exposed equipment population, available spare count, repair rate, repair-loop turnaround, cannibalisation, residual fleet life and maximum acceptable downtime.

9. RAMS, availability and life-cycle cost

9.1 Availability

Supply stress primarily affects restoration times and stock-out probability. In a redundant system, the effect may remain hidden until a second asset is lost; in non-redundant systems or common fleet components, the effect may propagate across multiple units.

$$A \approx MTBF / (MTBF + MDT)$$

This simplified expression illustrates the mechanism: a strong increase in logistics-driven MDT can reduce availability without any change in intrinsic MTBF. A real model must also represent redundancy, cannibalisation, repair loops, fleet configuration and operating restrictions.

9.2 LCC and volatility

Life-cycle cost is exposed through material-price increases, security premiums, strategic stock, qualification of alternative sources, redesign, obsolescence and the cost of unavailability. Some substitutions can reduce weight or cost; Alstom's copper/aluminium transformer example illustrates this possibility [6].

9.3 Circularity and repair

Recycling and refurbishment reduce dependence on primary materials but do not remove qualification constraints. The IEA identifies recycling as an increasingly important contribution to future mineral security [18]. In railways, extending component life through board repair, rewinding, refurbishment, parts recovery and controlled lifetime buys may be a practical first line of resilience.

10. Documentary method and proposed validation protocol

This publication uses an exploratory documentary review combining institutional, normative, industrial and academic sources. Sources were selected for railway relevance, traceability, preference for primary/institutional evidence, and ability to link a material to a component or maintenance risk. This is not yet a PRISMA systematic review.

Phase	Method	Data	Deliverable
P1	Systematic review — future consolidation	Scopus, WoS, IEEE, ScienceDirect, Springer + institutional sources	Corpus and adapted PRISMA grid
P2	Functional decomposition	Train/infrastructure architecture; traction power, traction, signalling functions	Subsystem taxonomy
P3	BOM / material data sheets	OEM BOMs, certificates, technical data	Component → material graph
P4	Supply-chain mapping	Mining/refining countries, suppliers, lead times, restrictions	Dependency map
P5	Delphi + AHP	Operators, maintainers, OEMs, supply-chain experts	RMCVI weights and thresholds
P6	Validation	Stocks, failures, consumption, disruption scenarios	Backtesting and sensitivity analysis

10.1 Target expert panel

An initial panel of approximately 20–40 experts could constitute a pragmatic starting point for a first Delphi phase, subject to response saturation, adequate representation of stakeholder categories and stability of the results. This range is not presented as a universal or mandatory panel size. The panel should cover rolling-stock and infrastructure maintenance, traction power, supply chain, spare parts, RAMS, components, OEM support and obsolescence management, with sufficient geographical diversity to limit bias.

10.2 Minimum industrial data

- component reference and function
- installed quantity per train/installation
- usable and quarantined stock
- annual consumption and failure history

- nominal, maximum and observed lead time
- number of qualified suppliers
- mean repair time
- alternative availability and qualification status
- contractual availability/support period
- obsolescence events and lifetime buys
- operational impact of stock-out

11. Proposed stress scenarios and experimental protocol

The S0–S6 scenarios are proposed test conditions, not results observed in an operating railway. They are intended for later sensitivity analysis once component, stock, failure and lead-time data are available.

Scenario	Shock	Main variable	Outputs
S0 — Baseline	No disruption	Nominal lead time	Reference cost, stock and availability
S1 — Price	Price ×2 or ×3	Unit cost	LCC, maintenance budget
S2 — Lead time	Lead time ×2	T_procurement	Stock-out risk
S3 — Supplier	Main supplier stops for 6 months	Alternative capacity	Stock coverage, cannibalisation
S4 — Export	12-month restriction by dominant country	Upstream supply	Time to shortage, premium cost
S5 — Obsolescence	Permanent end of production	T_recovery	Redesign, qualification, lifetime buy
S6 — Double shock	Obsolescence + material restriction	Correlation	System resilience and recovery time

Monte Carlo simulation can be added when distributions for lead time, consumption and failures are known. The objective is not to forecast geopolitics, but to quantify maintenance-system sensitivity to plausible disruptions.

12. O&M, contractual and strategic implications

12.1 Inventory policy

Traditional ABC segmentation by value should be complemented by resilience segmentation. A low-cost, non-substitutable part may justify more strategic coverage than its purchase value suggests. Economic stock, operational safety stock and strategic resilience stock should be distinguished.

12.2 Dual sourcing and advance qualification

Increasing stock is not always the most robust option. For some parts, advance qualification of a second source can reduce T_recovery more effectively. The preferred measure depends on failure rate, stock coverage, qualification time and supplier topology. Alstom also reports that geopolitical instability has led it to develop a supplier network across the different continents it serves, specifically to reduce exposure to country-to-country import blockages [6].

12.3 Contractual requirements

- guaranteed support duration for parts and components
- advance obsolescence notification
- identification of critical single-source items
- access to relevant BOM and material information
- qualified second source or qualification plan
- supplier stock obligations and maximum lead times
- repair rights, technical data and tooling
- redesign governance and cost sharing

- lifetime-buy and end-of-life provisions
- recycling, take-back and critical-material circularity

12.4 Resilience governance and strategic autonomy

For assets supporting an essential mobility function, resilience should be governed as an operational capability rather than a purchasing issue. The operator should map critical dependencies, identify single-source references, understand requalification times, preserve relevant repair capacity and size strategic stock against recovery time rather than historical consumption alone.

At national or major-network scale, the most structural measures are geographical diversification, advance qualification of alternative sources, control of technical data and repair rights, regional refurbishment capability, circularity, controlled lifetime buys and contractual requirements for obsolescence notification and continuity of support. The objective is not to manufacture every component domestically, but to prevent a single external and non-substitutable node from neutralising an essential mobility function for an unacceptable duration.

13. Discussion, limitations and research agenda

13.1 Current limitations

- Detailed railway BOMs are rarely public; many compositions can only be established with OEM data.
- Macroeconomic data describe a material or country, not the availability of a specific railway grade.
- Prices are not a direct measure of physical shortage.
- Architectures differ substantially across manufacturers, generations and electrification systems.
- Substitution can be technically possible but economically, contractually or regulatorily slow.
- Cannibalisation, repair and pooled stock must be modelled separately.
- The RMCVI remains an exploratory screening framework; weights, thresholds and ranking performance still require calibration and industrial validation.

13.2 Proposed contribution

The originality is not to demonstrate that critical materials exist — that is already established — but to formalise how upstream criticality can become railway maintenance risk. The proposed contribution is a method for ranking material-component pairs according to their capacity to create stock-out, increase MDT and, when an essential service is involved, weaken operational resilience.

13.3 Hypotheses to test

Hypothesis	Statement
H1	Geographical concentration alone poorly predicts O&M criticality without substitution and qualification variables.
H2	Qualification rigidity is a major multiplier of supply vulnerability.
H3	Fast-moving consumables and slow-moving insurance spares require different resilience policies.
H4	Inventory policy based only on historical consumption underestimates systemic supply shocks.
H5	Macroeconomic material rankings differ from functional railway criticality rankings.
H6	Qualified dual sourcing can reduce vulnerability more efficiently than additional stock beyond a given horizon.

14. Conclusion

The vulnerability of critical-material and component supply chains is becoming an increasingly concrete industrial issue. 2025–2026 data show concentration in refining, expanding trade restrictions, regional price divergences

and material-substitution strategies among railway manufacturers [1,2,6]. The IEA now places critical minerals at the centre of economic and national-security agendas [1], while European law addresses both resilient critical-material supply and resilience of rail transport entities [20,24].

For the operator-maintainer, the subject must never be reduced to “critical mineral = unavailable part”. The complete chain to the railway function must be demonstrated, repair and substitution options assessed, and stock coverage compared with recovery and qualification time. Only then is it legitimate to evaluate consequences for an essential service and, where appropriate, for strategic autonomy in mobility.

Concluding statement
Future railway maintenance will not only have to answer “when will this asset fail?”. It must also answer: “when it fails, will we still have access to the part, material, supplier, technical data, repair capability and qualification time required to restore service?”. For essential mobility functions, this restoration capability becomes a practical component of national resilience and strategic autonomy.

This publication proposes an exploratory framework for characterising vulnerabilities in railway critical materials and components. Its principal contribution is to connect upstream criticality to O&M, restoration time, operational availability and, where the railway function is essential, continuity of strategic mobility. The RMCVI remains a methodological hypothesis requiring calibration and validation on industrial data; it is not a normative indicator, a measure of sovereignty or an established predictive model.

Appendix A — EU list of 34 critical raw materials (2023 assessment; strategic status aligned with Regulation (EU) 2024/1252)

Regulatory note: names and status are aligned with Regulation (EU) 2024/1252, Annexes I and II. All strategic raw materials are critical, but not all critical raw materials are strategic. For some families, strategic status is explicitly grade- or use-specific (e.g. lithium, manganese, graphite, nickel, boron and rare earths for permanent magnets) [20].

Critical raw material (Regulation EU 2024/1252)	Strategic status — Annex I
Antimony	Critical only
Arsenic	Critical only
Bauxite / alumina / aluminium	Strategic
Baryte	Critical only
Beryllium	Critical only
Bismuth	Strategic
Boron / borates	Strategic for metallurgical-grade boron
Cobalt	Strategic
Coking coal	Critical only
Copper	Strategic
Feldspar	Critical only
Fluorspar	Critical only
Gallium	Strategic
Germanium	Strategic
Hafnium	Critical only
Helium	Critical only
Heavy rare earth elements	Partly strategic: rare-earth elements for permanent magnets (Tb, Dy, Gd)
Light rare earth elements	Partly strategic: rare-earth elements for permanent magnets (Nd, Pr, Sm, Ce)
Lithium	Strategic for battery grade
Magnesium	Strategic for magnesium metal
Manganese	Strategic for battery grade
Natural graphite	Strategic for battery-grade graphite

Nickel — battery grade	Strategic — battery grade
Niobium	Critical only
Phosphate rock	Critical only
Phosphorus	Critical only
Platinum group metals	Strategic
Scandium	Critical only
Silicon metal	Strategic
Strontium	Critical only
Tantalum	Critical only
Titanium metal	Strategic
Tungsten	Strategic
Vanadium	Critical only

This appendix reproduces the EU screening list. It does not mean that all 34 materials are present or critical in a particular railway system. Railway use must be demonstrated through a BOM, technical data sheet or sector-specific source [4].

Appendix B — Initial railway screening matrix

Subsystem	Component	Material / family	Evidence	Minimum source	Data required
Pantograph	Carbon strip	Carbon; copper depending on grade	E3	Mersen + wear literature	Consumption, stock, approved grades
3rd-rail collection	Collector shoe	Carbon/copper depending on grade	E3	Mersen	Consumption, stock, suppliers
Traction	PM motor	Nd/Pr/Dy/Tb depending on magnet	E3	IEA + Alstom	Motor type, magnet, rotor/motor spare
Traction	SynRM motor	No rotor rare-earth magnets	E3	Mitsubishi	Limited retrofit applicability
Traction	Converter	SiC	E3	Europe's Rail + publications	Module reference, supplier, redesign
Traction power	Transformer	Copper or aluminium	E3	Alstom	Actual design, repair loop
Electrical systems	Cables/conductors	Copper/aluminium	E2/E3	Established technology	Grades, sections, standards, suppliers
Energy storage	Battery pack	Li + chemistry-dependent materials	E3/E2	Hitachi + chemistry to confirm	Cell, cathode, BMS, pack
Signalling	Electronic boards	Ga/Ge/In/Ta/Sn etc. possible	E1	BOM required	Semiconductor refs, obsolescence
Track	Rails/alloys	V/Nb/Mn etc. depending on grade	E1	Material certificate	Exact grade and sourcing
Running gear	Wheels/axles	Alloys per specification	E1	Material certificate	Forge, supplier, qualification
Braking	Pads/discs	Proprietary formulations	E1	Material data sheet	Composition and second source

Appendix C — Raw data and figure reproducibility

Quantitative Figures 1, 2, 3, 4 and 7 are author reconstructions from institutional data; Figures 5, 6 and 8 are conceptual. The table records the values used to support reproducibility.

Figure	Raw data	Exact source	Transformation	Status
1	2011=14; 2014=20; 2017=27; 2020=30; 2023=34	JRC-RMIS [4]	Direct plot	Reconstructed
2	Base metals about +33%; lithium >+100%; cobalt about +130%; tungsten ×6	IEA 2026, Executive Summary [1]	Jan-2025=100: 133; ≥200; 230; 600	Reconstructed; not absolute price
3	2023=70%; 2025=72%	IEA 2026, Executive Summary [1]	Direct plot; rare earths excluded	Reconstructed
4	10%; 40%; 25%; 65%	Regulation (EU) 2024/1252, Art. 5 [20]	Regulatory thresholds	Reconstructed
5	None	Author model	Causal diagram	Conceptual

6	None	Author + [20,24–27]	Causal diagram	Conceptual
7	Mining ≈60%; refining=91%; sintered magnets=94%	IEA Rare Earth Elements 2026 [2]	2024 shares	Reconstructed
8	None	Author model	Conceptual comparison	Conceptual

References

Source selection principle
The final bibliography excludes market aggregators, unedited content and blogs whenever a claim can be supported by an institutional, normative, scientific or primary industrial source. Untraceable assertions on pantograph-strip manufacturing cost structure and automatic pass-through to selling prices are excluded.

Consolidation and dissemination protocol

For wider scientific dissemination or a later journal submission, the corpus can be extended to Scopus, Web of Science and IEEE Xplore. If the work is then presented as a systematic review, search strings, inclusion/exclusion criteria, period and duplicate handling should be documented using a PRISMA-type method. This version deliberately prioritises institutional sources, standards, scientific publications and primary industrial sources that can verify material-component relationships and the 2025–2026 context.

[1] International Energy Agency (IEA). (2026). Global Critical Minerals Outlook 2026. Paris: IEA. Published 16 July 2026. Key data used: Executive Summary (price developments; refining concentration) and Outlook (2035 copper supply balance). https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2026 (accessed 25 August 2026).

[2] International Energy Agency (IEA). (2026). Rare Earth Elements — Executive Summary. Paris: IEA. Data used: 2024 shares for magnet-rare-earth mining, refining and sintered permanent-magnet production. https://www.iea.org/reports/rare-earth-elements/executive-summary (accessed 25 August 2026).

[3] European Commission. (2026). Critical Raw Materials Act: securing sustainable supply chains for Europe. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en (accessed 25 August 2026).

[4] European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2026). Raw Materials Information System (RMIS) — EU Critical Raw Materials. JRC. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials (accessed 25 August 2026).

[5] U.S. Geological Survey (USGS). (2026). Mineral Commodity Summaries 2026. Reston, VA: U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2026 (accessed 25 August 2026).

[6] Alstom. (2026, 22 May). Resilience in railways: the art of developing future-proof trains in an uncertain world. Alstom. https://www.alstom.com/press-releases-news/2026/5/resilience-railways-art-developing-future-proof-trains-uncertain-world (accessed 25 August 2026).

[7] Mersen. (n.d.). Pantograph Contact Strips — Power Transfer for Rail. Mersen. https://www.mersen.com/en/products/power-transfer-products-rail/pantograph-contact-strips (accessed 25 August 2026).

[8] Hitachi Rail. (n.d.). Battery Commuter Trains. Hitachi Rail. https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/rolling-stock/battery-powered-trains/battery-commuter-trains/ (accessed 25 August 2026).

[9] Mitsubishi Electric. (2025, 3 October). Railcar Motor System Wins R&D 100 Award — SynTRACS. Mitsubishi Electric. https://www.mitsubishielectric.com/en/pr/2025/1003/ (accessed 25 August 2026).

[10] Europe's Rail Joint Undertaking. (2024). Towards more efficient, Silicon Carbide-based traction systems. Europe's Rail JU. https://rail-research.europa.eu/latest-news/towards-more-efficient-silicon-carbide-based-traction-systems/ (accessed 25 August 2026).

[11] Zhi, X., Zhou, N., Wei, H., Chen, H., Cheng, Y., Sun, Y., Zhao, L., Huang, G., et al. (2025). Analysis of the abnormal wear of the pantograph contact strip through combined experimental and simulation approaches. Scientific Reports, 15, Article 45706. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28380-0.

[12] Paul, S., et al. (2022). State-of-the-art review of railway traction motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway. Energy Reports, 8, 14623–14642. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.411.

[13] Yıldırım, D., Akşit, M. H., Çadırcı, I., & Ermiş, M. (2022). All-SiC Traction Converter for Light Rail Transportation Systems: Design Methodology and Development of 165 kVA Prototype. Electronics, 11(9), 1438. https://doi.org/10.3390/electronics11091438.

[14] Saad, E., Besbes, M., Bourgeois, V., Czmil, V., & Zolghadri, M. (2026; first online 4 October 2025). A New Hybrid Approach for Identifying Obsolescence Features: Applied to Railway Signaling Infrastructure. In Transport Transitions:

Advancing Sustainable and Inclusive Mobility (TRAconference 2024), Lecture Notes in Mobility, pp. 174–180. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04774-8_26.

[15] Driessen, M. A., Arts, J. J., van Houtum, G.-J., Rustenburg, J. W., & Huisman, B. (2015). Maintenance spare parts planning and control: a framework for control and agenda for future research. Production Planning & Control, 26(5), 407–426. https://doi.org/10.1080/09537287.2014.907586.

[16] Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. Mathematical Modelling, 9(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8.

[17] Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). (1975). The Delphi Method: Techniques and Applications. Reading, MA: Addison-Wesley.

[18] International Energy Agency (IEA). (2024). Recycling of Critical Minerals — Executive Summary. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals/executive-summary (accessed 25 August 2026).

[19] King, J., & Gugala, O. (2018, 9 July). Effective Reliability, Availability, Maintainability (RAM) and Safety (S), Principles and Guidelines for Large Subsurface Metro and Main Line Projects. Crossrail Learning Legacy / ICE Publishing. https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/effective-reliability-availability-maintainability-ram-and-safety-s-principles-and-guidelines-for-large-subsurface-metro-and-main-line-projects/ (accessed 25 August 2026).

[20] European Parliament & Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials. Official Journal of the European Union, L, 2024/1252, 3 May 2024. Relevant provisions: Arts. 3–5, 20–24; Annex I; Annex II. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj (accessed 25 August 2026).

[21] International Energy Agency (IEA). (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025 (accessed 25 August 2026).

[22] British Standards Institution (BSI). (2024). BS EN 50126-1:2017+A1:2024, Railway applications — The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) — Part 1: Generic RAMS process. London: BSI.

[23] Mersen. (n.d.). Spare Parts — Power Transfer for Rail. Mersen. https://www.mersen.com/en/products/power-transfer-products-rail/spare-parts (accessed 25 August 2026).

[24] European Parliament & Council of the European Union. (2022). Directive (EU) 2022/2557 of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC. Official Journal of the European Union, L 333, 27 December 2022, pp. 164–198. Relevant rail scope: Annex, sector 5 (Transport), subsector rail. ELI: http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj (accessed 25 August 2026).

[25] European Railway Clusters Initiative (ERCI). (2023–2026). LEADER 2030 — Learnings for European Autonomy to Deliver Europe’s Rail in 2030. Europe’s Rail Joint Undertaking project, call HORIZON-ER-JU-2022-ExpIR-06. https://www.eurailclusters.com/erci_project/leader-2030/ (accessed 25 August 2026).

[26] European Railway Clusters Initiative (ERCI). (2026, 17 April). LEADER 2030 concluded with a final conference at the European Parliament: “From supply risks to strategic autonomy”. Conference held 8 April 2026. ERCI. https://www.eurailclusters.com/leader-2030-concluded-with-a-final-conference-at-the-european-parliament/ (accessed 25 August 2026).

[27] General Secretariat of the Council of the European Union. (2026, 5 June). A strategic approach for the European railway industry. Note 10057/1/26 REV 1, TRANS 383, AOB for the Transport, Telecommunications and Energy Council meeting of 8 June 2026; information from Austria, Croatia, France, Germany, Greece, Italy, Luxembourg, Poland, Portugal and Romania. Brussels, pp. 1–3. Relevant passages: p. 1 on transport sovereignty, critical-infrastructure resilience and strategic autonomy; pp. 2–3 on security of supply and critical dependencies. https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10057-2026-REV-1/en/pdf (accessed 25 August 2026).

**GI CONSULTING MOBILITY &
ECOLOGICAL INNOVATION**

RISQUES D'APPROVISIONNEMENT EN MATIÈRES ET COMPOSANTS CRITIQUES DANS LE FERROVIAIRE

De la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement à la résilience O&M et à la souveraineté opérationnelle des mobilités : le cadre de screening RMCVI

Document de travail indépendant de recherche appliquée - Édition anglais/français/arabe - Version 1.0 (première édition trilingue)

Issame Garchali
Expert CFO / traction électrique / HT-BT — Exploitation & Maintenance

27 août 2026
DOI: 10.5281/zenodo.22127446

Version française — traduction intégrale de la version anglaise de référence. Ce document de travail indépendant de recherche appliquée est destiné à la diffusion professionnelle et scientifique exploratoire. Les relations matière-composant sont sourcées ; le RMCVI constitue un cadre de screening original qui reste à calibrer et à valider sur des données industrielles. Cette version n'a pas fait l'objet d'une évaluation par les pairs.

Positionnement de la publication

Positionnement
Cette publication indépendante est conçue pour une diffusion professionnelle et scientifique exploratoire. Son objet central est l'exploitation-maintenance : elle étudie comment une vulnérabilité amont — matière, raffinage, composant, fournisseur ou technologie — peut allonger le temps de rétablissement, dégrader la disponibilité et perturber une fonction de mobilité essentielle. Le terme « souveraineté » est employé ici dans un sens opérationnel et circonscrit : la capacité d'un pays et de ses opérateurs à maintenir des services de mobilité critiques sans dépendance extérieure excessive sur des maillons non substituables. Il ne s'agit ni d'un plaidoyer pour l'autarcie, ni d'une affirmation selon laquelle toute tension matière constitue à elle seule une menace de souveraineté. Les données macroéconomiques proviennent prioritairement de sources institutionnelles ; les relations matière–composant sont étayées par des sources ferroviaires primaires et des publications académiques. Le RMCVI est une contribution méthodologique exploratoire à valider empiriquement.

Le document distingue trois classes d'énoncés : (i) faits documentés, (ii) inférences techniques raisonnables reposant sur plusieurs sources, et (iii) hypothèses à tester sur données de nomenclature, stocks, lead times et historiques de maintenance. Cette séparation est essentielle pour éviter de transformer une vulnérabilité potentielle en « pénurie ferroviaire » non démontrée.

Résumé

L'électrification, la numérisation et l'augmentation des performances du système ferroviaire renforcent sa dépendance à des matériaux et composants dont les chaînes d'approvisionnement peuvent être fortement concentrées, soumises à des restrictions commerciales ou caractérisées par de longs délais de substitution et de qualification. Plusieurs signaux récents rendent cette vulnérabilité observable : l'AIE considère que 2025 a marqué la matérialisation à grande échelle des risques économiques liés aux chaînes très concentrées et documente, entre janvier 2025 et avril 2026, des hausses marquées sur plusieurs matières [1].

Le ferroviaire est directement concerné par plusieurs chaînes documentées : carbone/cuivre pour les bandes de contact de pantographes [7], terres rares pour certains moteurs de traction à aimants permanents [6], cuivre ou aluminium pour certains transformateurs ferroviaires [6], lithium-ion pour des trains à batteries [8], et carbure de silicium pour des convertisseurs de traction [10,13].

Cette étude déplace l'analyse depuis la seule « criticité minérale » vers une criticité de chaîne fonctionnelle : matière → transformation → composant → sous-système → pièce de rechange → maintenance → disponibilité → continuité du service essentiel. Elle propose un Railway Material & Component Vulnerability Index (RMCVI) combinant risque amont, dépendance fonctionnelle, non-substituabilité, rigidité de qualification et exposition logistique. Le RMCVI n'est ni une norme, ni une méthode de certification, ni un indicateur prédictif validé ; il constitue un cadre de screening exploratoire à calibrer sur des données industrielles.

La thèse défendue est qu'une faible quantité de matière peut produire un effet opérationnel disproportionné lorsqu'elle est incorporée dans un composant indispensable, mono-sourcé, difficilement substituable et soumis à une qualification longue. L'enjeu O&M n'est donc pas seulement de savoir quand un actif tombera en panne, mais si l'exploitant pourra obtenir, réparer ou requalifier la pièce nécessaire avant l'épuisement de ses marges logistiques. Lorsque l'actif contribue à une

fonction de transport essentielle, cette question dépasse la maintenance : elle devient un enjeu de résilience nationale et d’autonomie stratégique des mobilités [20,24]. Il s’agit d’une proposition conceptuelle à tester sur des données industrielles ; le document ne prétend pas établir une relation quantitative universelle entre masse de matière et vulnérabilité opérationnelle.

Mots-clés : ferroviaire, matières premières critiques, supply chain, exploitation-maintenance, RAMS, disponibilité, obsolescence, pièces de rechange, cuivre, graphite, terres rares, lithium, SiC, services essentiels, résilience nationale, autonomie stratégique.

Abstract

Railway electrification and digitalisation increase dependence on materials and components whose supply chains can be highly concentrated, exposed to export restrictions or difficult to substitute. This independent applied-research publication connects upstream supply risk to maintenance logistics, RAMS performance, essential-service continuity and, where critical mobility functions are affected, national resilience and strategic autonomy. It proposes a Railway Material & Component Vulnerability Index (RMCVI) and a time-to-impact logic comparing stock coverage with recovery and requalification time. The RMCVI is an exploratory screening framework, not a standard, certification method or validated predictive indicator.

Sommaire

1. Introduction et problématique
2. État de l’art : criticité, résilience, maintenance et autonomie stratégique
3. Contexte 2025–2026 : concentration, prix et restrictions
4. De la matière au service ferroviaire : modèle causal
5. Cartographie des familles de matières et composants
6. Études de cas ferroviaires
7. Proposition du RMCVI et lecture stratégique
8. Dimension temporelle : stock coverage vs. recovery time
9. Intégration RAMS, disponibilité et LCC
10. Méthode documentaire et protocole de validation proposé
11. Scénarios de stress proposés et protocole expérimental
12. Implications O&M, contractuelles et stratégiques
13. Discussion, limites et agenda de recherche
14. Conclusion

Annexe A — Liste UE des 34 matières premières critiques (évaluation 2023 ; statut stratégique aligné sur le règlement (UE) 2024/1252)

Annexe B — Matrice de screening ferroviaire

Bibliographie

1. Introduction et problématique

Les politiques de maintenance ferroviaire sont historiquement structurées autour de la fiabilité des actifs, du dimensionnement des stocks, du préventif, du correctif, de la maintenabilité et de la maîtrise des temps de rétablissement. Ce cadre reste indispensable, mais il suppose implicitement qu'une pièce de rechange ou un composant compatible pourra être obtenu, réparé ou remplacé dans un horizon raisonnable.

Cette hypothèse devient moins robuste lorsque la chaîne industrielle dépend d'une matière raffinée dans un nombre limité de pays, d'un procédé spécialisé, d'une propriété intellectuelle détenue par un équipementier, d'un composant électronique en obsolescence ou d'une qualification ferroviaire longue. Le risque n'est alors plus seulement technique : il devient industriel, logistique, contractuel et géopolitique. Pour une infrastructure de mobilité essentielle, une dépendance non maîtrisée peut également affecter la capacité d'un pays à maintenir durablement le service lorsque l'accès à un maillon critique est perturbé.

La question centrale est donc la suivante : dans quelle mesure une perturbation d'approvisionnement en matières ou composants critiques peut-elle se propager jusqu'à la maintenabilité et à la disponibilité opérationnelle d'un système ferroviaire, puis, lorsque la fonction concernée est essentielle, jusqu'à la résilience et à l'autonomie stratégique des mobilités ?

1.1 Questions de recherche

RQ1 — Identification: Quelles matières et quels composants sont réellement présents dans les sous-systèmes ferroviaires, et avec quel niveau de preuve ?

RQ2 — Propagation: Par quels maillons une perturbation amont peut-elle atteindre la maintenance puis le service ?

RQ3 — Temporalité: Quel délai sépare un choc d'approvisionnement et l'apparition d'une rupture de disponibilité en atelier ou sur infrastructure ?

RQ4 — Amplification: Quels facteurs amplifient le risque : mono-sourcing, lead time, faible stock, obsolescence, rigidité de qualification, faible réparabilité, dépendance OEM ?

RQ5 — Résilience et autonomie stratégique : Quelles mesures O&M — stock stratégique, dual sourcing, redesign, réparation, reconditionnement, recyclage, maîtrise des données et clauses contractuelles — réduisent le plus efficacement la dépendance susceptible d'affecter la continuité d'un service essentiel ?

1.2 Proposition centrale à tester

Hypothèse directrice
La criticité O&M d'une matière n'est pas proportionnelle à sa masse dans le système. Elle résulte de la combinaison entre risque amont, indispensabilité fonctionnelle, concentration fournisseur, non-substituabilité, délai logistique et rigidité de qualification. Quelques grammes intégrés à un composant non substituable peuvent être plus critiques pour la disponibilité qu'une matière consommée en tonnes. Lorsque ce composant soutient une fonction de transport essentielle, la criticité O&M peut devenir une vulnérabilité de résilience nationale : l'enjeu est alors la capacité à maintenir le service malgré une dépendance extérieure perturbée.

2. État de l’art : criticité, résilience, maintenance et autonomie stratégique

2.1 Criticité des matières : approche macroéconomique

L’Union européenne évalue la criticité des matières à partir de dimensions telles que l’importance économique et le risque d’approvisionnement, en intégrant notamment concentration géographique, gouvernance, dépendance aux importations, substituabilité et recyclage. La liste 2023 compte 34 matières premières critiques ; le Critical Raw Materials Act distingue en outre les matières stratégiques et fixe des objectifs de diversification à l’horizon 2030 [3,4].

L’AIE utilise une logique comparable mais orientée systèmes énergétiques, en analysant concentration des chaînes, équilibre offre-demande, restrictions commerciales, substituabilité et importance sectorielle. Son édition 2026 insiste sur la matérialisation effective des risques de concentration en 2025 [1].

Les Mineral Commodity Summaries 2026 de l’USGS sont utilisés comme source indépendante de recoupement pour le contexte de production et de réserves minières ; ils ne constituent pas la source des données de prix de l’AIE ni de la projection d’équilibre offre-demande 2035 utilisée dans ce document [5].

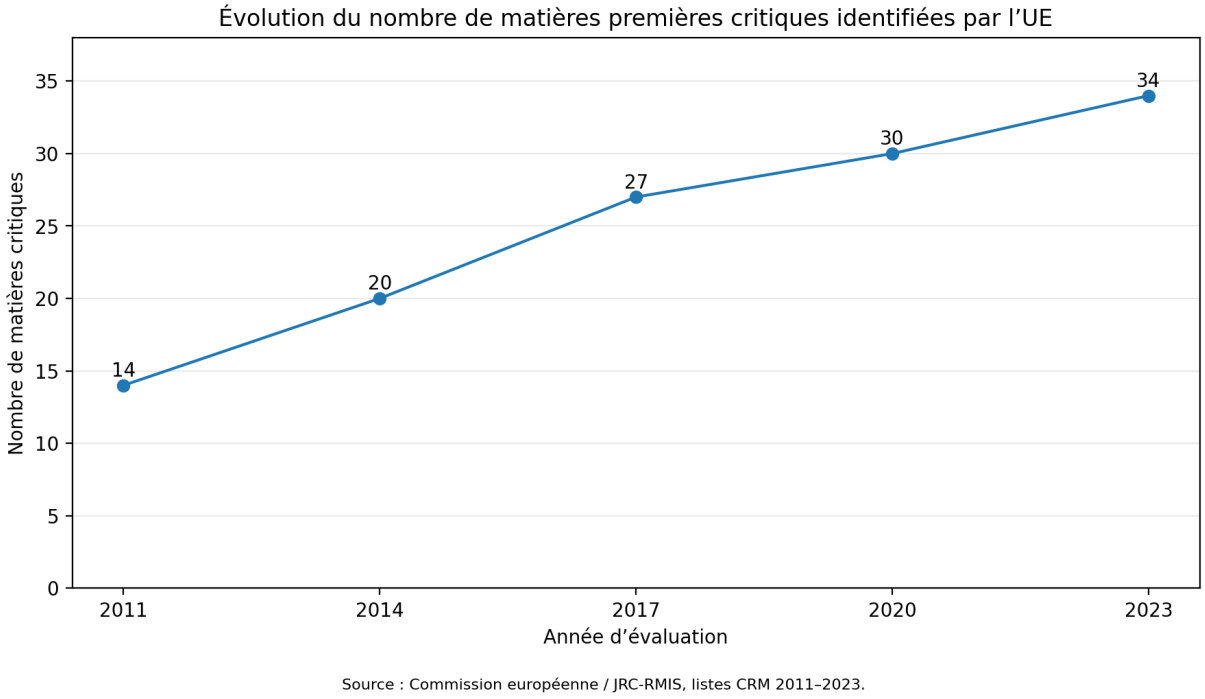


Figure 1 — Élargissement progressif du périmètre des matières critiques de l’UE

Traçabilité : source JRC-RMIS / Commission européenne, listes CRM 2011, 2014, 2017, 2020 et 2023 [4]. Données brutes utilisées : 14, 20, 27, 30 et 34 matières/familles. Figure reconstruite par l’auteur sous forme de série chronologique ; aucune donnée de prix ni estimation n’est introduite. Consultation : 25 août 2026.

2.2 Travaux ferroviaires existants sur les dépendances et l’autonomie

Plusieurs travaux européens ont déjà identifié la dépendance de la chaîne ferroviaire aux matières premières, composants et technologies critiques. Le projet LEADER 2030 (Learnings for European Autonomy to Deliver Europe’s Rail in 2030), financé dans le cadre de Europe’s Rail Joint Undertaking, cartographie les perturbations de la chaîne d’approvisionnement ferroviaire, les besoins technologiques à l’horizon 2030 et les risques d’autonomie, de goulets d’étranglement et de dépendance en matières premières [25]. Sa conférence finale

s’est tenue au Parlement européen le 8 avril 2026 ; ERCI a publié le compte rendu le 17 avril 2026, en reliant explicitement risques d’approvisionnement, résilience et autonomie stratégique du rail européen [26].

Une note d’information datée du 5 juin 2026, soumise par l’Autriche, la Croatie, la France, l’Allemagne, la Grèce, l’Italie, le Luxembourg, la Pologne, le Portugal et la Roumanie au titre du point AOB de la réunion du Conseil Transports, télécommunications et énergie du 8 juin 2026, qualifie l’industrie ferroviaire européenne d’actif stratégique, associe sa résilience à la souveraineté des transports, à la résilience des infrastructures critiques et à l’autonomie stratégique, et appelle à une analyse des dépendances critiques du secteur [27]. Il s’agit d’une note d’information de ces dix États membres, et non d’une position formellement adoptée par le Conseil.

Positionnement de la contribution : la présente publication ne revendique donc pas la découverte de la dépendance du ferroviaire aux matières critiques. Sa contribution proposée réside dans la formalisation d’une chaîne causale orientée O&M — matière → composant → maintenance → MDT/disponibilité → service essentiel — et dans la proposition exploratoire du RMCVI pour caractériser la vulnérabilité de cette chaîne au niveau de l’exploitant-mainteneur.

Périmètre géographique : les références réglementaires et une part importante des sources industrielles mobilisées dans cette version sont européennes, complétées par des sources industrielles japonaises. Le cadre proposé vise à être transposable au-delà de l’Europe, mais aucune applicabilité universelle n’est revendiquée sans recalibrage selon le contexte réglementaire local, la structure des fournisseurs, les technologies de flotte, les pratiques de maintenance et les dépendances géopolitiques.

2.3 Limite de l’approche macroéconomique pour l’O&M

Une matière peut être critique pour l’économie européenne sans être critique pour un exploitant ferroviaire donné ; inversement, un composant ferroviaire peut être extrêmement critique même si ses matières ne franchissent pas un seuil macroéconomique. La maille pertinente pour l’O&M est donc le couple composant-fonction, puis la chaîne de substitution associée.

Cette logique rejoint la littérature sur les pièces de rechange de biens de capital, qui distingue la demande de pièces, la réparation, les stocks et le risque d’indisponibilité. Les travaux sur l’obsolescence ferroviaire montrent également que les composants électriques et électroniques à long cycle de vie exigent des stratégies spécifiques [14,15].

Dans la suite du document, trois termes sont distingués : risque = plausibilité/probabilité d’une perturbation combinée à ses conséquences ; vulnérabilité = sensibilité de la chaîne ou du système à cette perturbation ; criticité = importance du composant ou de la fonction pour le système. Le RMCVI mesure principalement une vulnérabilité de chaîne ; il ne constitue pas, à lui seul, une mesure complète du risque puisqu’il n’intègre pas explicitement une probabilité d’occurrence.

2.4 RAMS, support logistique et chaîne d’approvisionnement

Dans une approche RAMS, une rupture d’approvisionnement ne dégrade pas nécessairement le MTBF de l’actif installé. Elle agit surtout sur le temps d’indisponibilité après panne, en augmentant le délai logistique et parfois le délai de requalification. La disponibilité peut donc se dégrader alors même que la fiabilité intrinsèque de l’équipement reste inchangée.

$$\mathbf{MDT = Tdiagnostic + Tmaintenance + Tlogistique + Tadministratif + Tremise_en_service}$$

Le cadre proposé place donc la supply chain dans la chaîne du Mean Down Time (MDT), avec une attention particulière au délai d’acquisition, de réparation, de redesign et de validation d’une alternative.

À titre d’exemple appliqué au ferroviaire, le Crossrail Learning Legacy montre comment exigences RAMS, modélisation de performance et contributions RAM des fournisseurs ont été intégrées à l’échelle d’un grand programme ferroviaire ; cette source est utilisée ici comme retour d’expérience RAMS, et non comme méthode d’évaluation de la criticité des matières [19].

La norme EN 50126-1, dans son édition nationale applicable, fournit le cadre générique RAMS du cycle de vie ferroviaire [22]. Elle ne constitue pas une méthode d'évaluation de la criticité des matières premières. Dans cette publication, la chaîne d'approvisionnement est traitée comme une contrainte externe de soutien : une rupture n'altère pas nécessairement la fiabilité intrinsèque de l'actif, mais peut dégrader la maintenabilité et la disponibilité en allongeant l'accès aux pièces, aux capacités de réparation, aux ressources logistiques ou à la qualification d'une solution alternative. La référence [22] correspond à l'édition britannique BS EN 50126-1:2017+A1:2024 et n'est pas présentée comme une exigence contractuelle universelle.

2.5 Mobilité essentielle, résilience nationale et souveraineté opérationnelle

La directive (UE) 2022/2557 sur la résilience des entités critiques traite le transport comme un secteur essentiel et inclut explicitement, pour le rail, les gestionnaires d'infrastructure, les entreprises ferroviaires et les opérateurs d'installations de service [24]. Le ferroviaire ne doit donc pas être considéré uniquement comme un marché industriel : selon les systèmes et les États, il participe au maintien de fonctions sociétales et économiques essentielles.

En parallèle, le règlement (UE) 2024/1252 sur les matières premières critiques vise à sécuriser des approvisionnements résilients et durables et relie explicitement cette politique à la résilience économique et à « l'autonomie stratégique ouverte » de l'Union [20]. Ces deux cadres ne démontrent pas qu'une pénurie de matière entraîne automatiquement une atteinte à la souveraineté ; ils établissent en revanche que la résilience des approvisionnements et la continuité des fonctions critiques appartiennent au même espace de sécurité économique et opérationnelle.

Dans cette publication, la « souveraineté opérationnelle des mobilités » désigne donc la capacité d'un pays, de ses autorités organisatrices et de ses exploitants à maintenir des fonctions essentielles de transport malgré une perturbation externe, sans dépendance excessive à un composant, un fournisseur, une technologie ou une capacité de réparation non substituable. Cette définition privilégie la maîtrise du risque, la diversification, la réparabilité, les stocks stratégiques et les capacités industrielles de soutien ; elle ne suppose pas l'autarcie. Cette expression constitue un cadre analytique défini par l'auteur pour ce working paper ; elle ne correspond ni à une notion normalisée ni à un construit empiriquement validé.

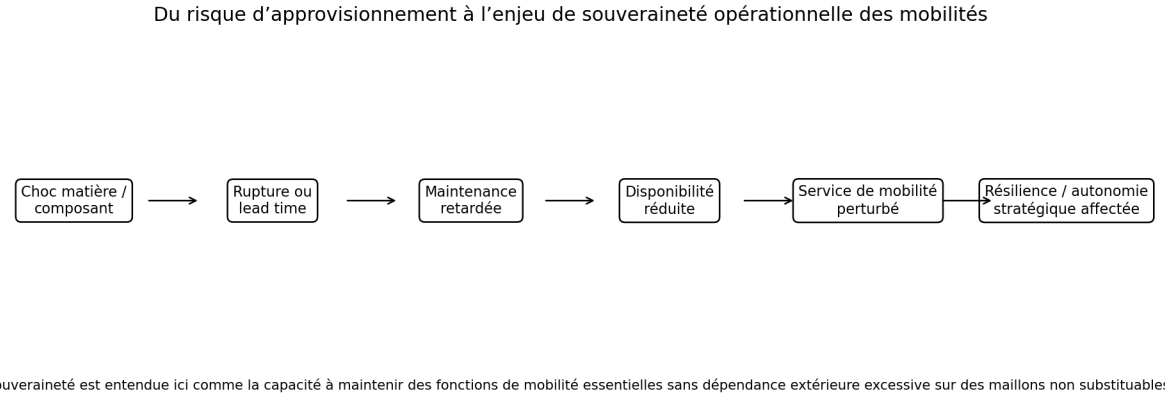


Figure 6 — Du risque d'approvisionnement à l'enjeu de souveraineté opérationnelle des mobilités

Traçabilité : modèle conceptuel de l'auteur articulé avec la directive (UE) 2022/2557 [24], le règlement (UE) 2024/1252 [20], LEADER 2030 [25,26] et la note du Conseil du 5 juin 2026 [27]. Aucune donnée quantitative brute ; figure conceptuelle.

3. Contexte 2025–2026 : concentration, prix et restrictions

3.1 Rebond des prix

Entre janvier 2025 et avril 2026, l'AIE rapporte une hausse d'environ un tiers des prix de plusieurs métaux de base tels que l'aluminium, le cuivre et l'étain. Le lithium a plus que doublé, le cobalt a progressé d'environ 130 %, tandis que le tungstène a été multiplié par six. En Europe, le gallium et certaines terres rares lourdes se négocient autour de cinq fois les prix domestiques chinois [1].

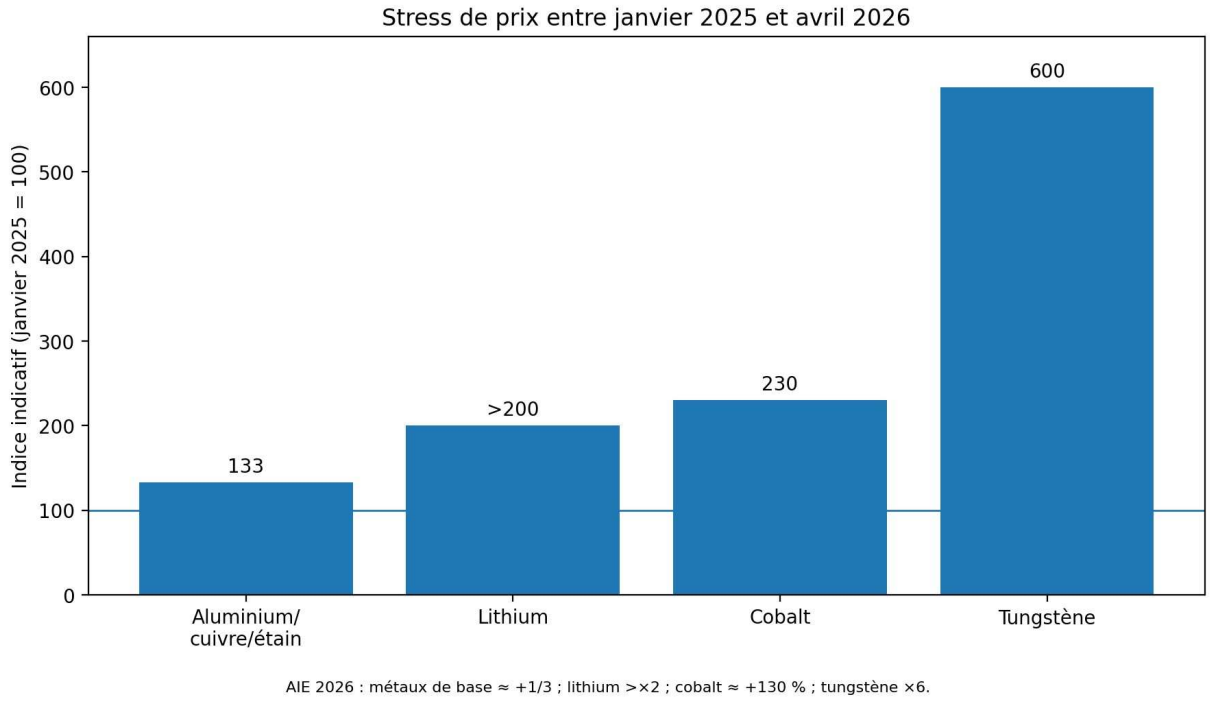


Figure 2 — Ordres de grandeur du stress de prix observé en 2025–début 2026

Traçabilité : IEA, Global Critical Minerals Outlook 2026, Executive Summary, figure « Price developments for selected critical minerals by category, January 2023-April 2026 » [1]. Données textuelles utilisées : métaux de base ≈ +1/3 ; lithium >×2 ; cobalt ≈ +130 % ; tungstène ×6. Méthode : reconstruction en indice de variation avec janvier 2025 = 100 (133 ; ≥200 ; 230 ; 600). Il s'agit d'indices/facteurs de variation, pas de prix absolus. Données observées par l'AIE ; représentation reconstruite par l'auteur. Consultation : 25 août 2026.

3.2 Concentration du raffinage

La concentration ne se limite pas à l'extraction. L'AIE indique qu'en excluant les terres rares, la part moyenne du premier pays raffineur est passée de 70 % en 2023 à 72 % en 2025. Dans le manganèse, le nickel et le graphite, la quasi-totalité de la croissance récente de l'offre raffinée est venue du fournisseur dominant [1].

À une autre maille de concentration, l'AIE indiquait dans son édition 2025 que la part moyenne des trois premiers pays raffineurs pour le cuivre, le lithium, le nickel, le cobalt, le graphite et les terres rares était passée d'environ 82 % en 2020 à 86 % en 2024 [21]. Les deux indicateurs ne sont pas interchangeables : l'un mesure le premier fournisseur, l'autre le cumul des trois premiers.

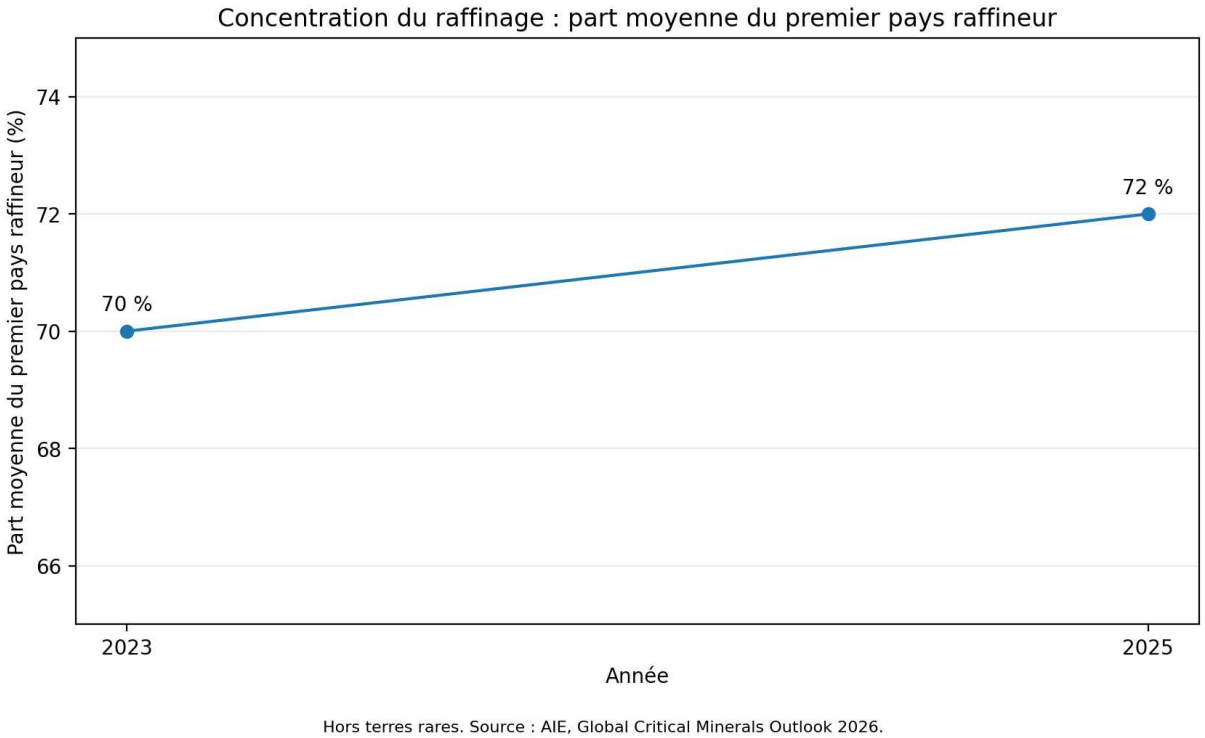


Figure 3 — Concentration du raffinage des minéraux énergétiques clés

Traçabilité : IEA, Global Critical Minerals Outlook 2026, Executive Summary [1]. Données brutes : part moyenne du premier pays raffineur, hors terres rares, 70 % en 2023 et 72 % en 2025. Figure reconstruite par l'auteur ; ne pas confondre avec la part cumulée des trois premiers pays. Consultation : 25 août 2026.

3.3 Réponse réglementaire européenne

Le Critical Raw Materials Act fixe pour 2030 des repères de capacité : au moins 10 % des besoins annuels de l'UE en extraction, 40 % en transformation et 25 % en recyclage, ainsi qu'un objectif de diversification limitant à 65 % la part provenant d'un seul pays tiers à une étape pertinente de la chaîne [3,20].

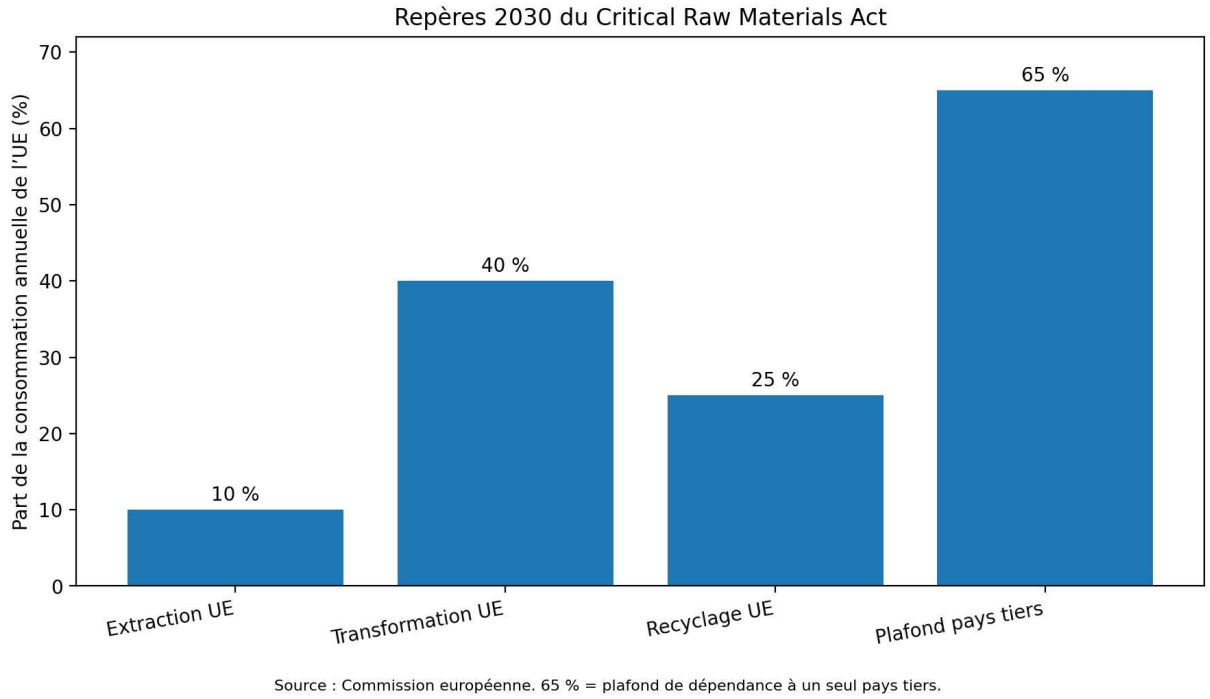


Figure 4 — Repères 2030 du Critical Raw Materials Act

Traçabilité : règlement (UE) 2024/1252, article 5 [20]. Données brutes : extraction UE 10 %, transformation UE 40 %, recyclage UE 25 %, plafond de dépendance à un seul pays tiers 65 %. Figure reconstruite par l'auteur à partir des seuils réglementaires. Consultation EUR-Lex : 25 août 2026.

3.4 Projection cuivre

Le cuivre est particulièrement important pour le CFO ferroviaire. Dans son scénario central, l'AIE projette encore pour 2035 un écart d'environ 25 % entre l'offre issue des projets anticipés et les besoins, malgré une amélioration par rapport à l'édition précédente [1]. Cette projection ne signifie pas une rupture automatique du marché ferroviaire ; elle signale toutefois une tension structurelle potentiellement pertinente pour les investissements, les réparations lourdes, les transformateurs, les câbles et les machines électriques.

4. De la matière au service ferroviaire : modèle causal

Le problème scientifique consiste à éviter deux raccourcis : (1) déduire un risque ferroviaire à partir de la seule criticité d'un minerai ; (2) déduire une pénurie de pièce à partir d'une hausse de prix. Le modèle doit démontrer le chemin de propagation complet.

Modèle conceptuel : propagation d’un choc matière jusqu’à la disponibilité ferroviaire

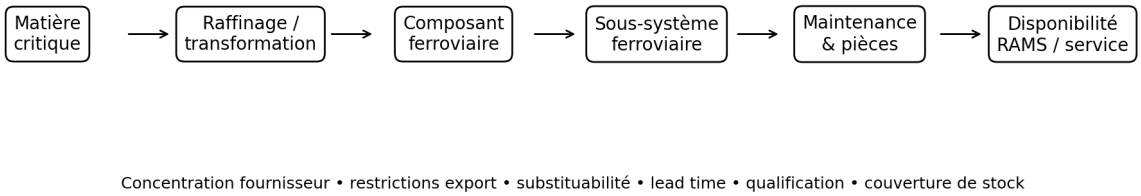


Figure 5 — Chaîne de propagation proposée

Traçabilité : modèle conceptuel de l’auteur. Aucune donnée quantitative brute ; la figure formalise les niveaux d’analyse proposés et doit être lue comme un schéma méthodologique, non comme un résultat empirique.

4.1 Niveaux d’analyse

L0 — Matière: Extraction et disponibilité primaire.

L1 — Raffinage / transformation: Purification, métallurgie, matériaux avancés.

L2 — Composant: Aimant, bande carbone, cellule batterie, module SiC, conducteur, bobinage, etc.

L3 — Sous-système: Pantographe, moteur, convertisseur, transformateur, batterie, signalisation, etc.

L4 — Maintenance: Stock, réparation, remplacement, requalification, obsolescence.

L5 — Service : Indisponibilité rame, installation ou capacité de transport.

L6 — Résilience stratégique : Lorsque le service est essentiel, appréciation de l’impact sur la continuité de mobilité, les capacités économiques associées et l’autonomie opérationnelle face à une dépendance extérieure.

4.2 Échelle de preuve

Niveau	Définition	Usage dans cette étude
E3 — Direct	Source ferroviaire primaire ou publication scientifique établissant explicitement l’usage.	Peut soutenir une conclusion ferme sur la présence/usage.
E2 — Fort	Technologie bien établie dans l’industrie ferroviaire mais composition précise dépendante du produit.	Conclusion sur la famille technologique, prudence sur la matière exacte.
E1 — À vérifier	Lien plausible via électronique, alliage ou BOM générique.	Ne pas conclure sans nomenclature ou fiche matière.
E0 — Non établi	Aucune preuve suffisante dans le périmètre étudié.	Exclu des conclusions ; conservé comme question de recherche.

5. Cartographie des familles de matières et composants

Le screening initial distingue les matières dont le lien ferroviaire est directement documenté de celles qui ne peuvent être confirmées qu'au niveau des nomenclatures (BOM). Cette distinction évite l'erreur consistant à placer automatiquement toute matière critique européenne dans un train.

Matière / famille	Lien ferroviaire candidat	Preuve	Prudence méthodologique
Carbone / grades carbonés	Bandes de pantographe, frotteurs 3e rail	E3	Composition exacte et origine graphite à établir grade par grade.
Cuivre	Bandes imprégnées, câbles, bobinages, transformateurs, conducteurs	E3	Exposition prix/volume ; substitution partielle selon architecture.
Aluminium	Gaines/supports, structures, conducteurs/transformateurs selon conception	E3/E2	Peut substituer le cuivre dans certaines applications documentées.
Nd / Pr / Dy / Tb	Aimants permanents de certains moteurs de traction	E3	Chaîne de raffinage et aimants très concentrée.
Lithium	Cellules Li-ion de trains à batteries	E3	Criticité dépend de chimie et stratégie de remplacement pack.
Nickel / cobalt / manganèse	Certaines chimies Li-ion	E2	Ne pas généraliser sans chimie cellule.
Graphite naturel / synthétique	Anodes batteries ; matériaux carbonés selon procédés	E2/E1	Pantographe : origine exacte du carbone à démontrer.
Silicium / SiC	Modules de puissance, convertisseurs traction	E3 pour SiC	Risque souvent au niveau wafer/module qualifié plutôt que minerai.
Gallium / germanium / indium / tantale / étain	Électronique avancée selon BOM	E1	Exiger BOM et fabricant ; ne pas présumer la présence.
Tungstène / vanadium / niobium / titane	Alliages et composants spécialisés selon nuance	E1	Vérification matériau et norme fournisseur indispensable.
PGM	Applications spécialisées potentielles	E0/E1	Aucune généralisation ferroviaire dans cette version.

6. Études de cas ferroviaires

6.1 Cas A — Bande de contact de pantographe

Mersen documente des bandes de contact ferroviaires en matériaux carbonés, avec des grades purs ou imprégnés de cuivre, des gaines pouvant être en aluminium, cuivre ou acier, et des optimisations spécifiques de l'imprégnation cuivre pour les fortes intensités [7]. Les travaux tribologiques récents confirment que l'usure des bandes carbone constitue un sujet directement lié à l'exploitation-maintenance [11].

Correction d'un raccourci fréquent
Il serait scientifiquement incorrect d'écrire : « pénurie de graphite naturel = pénurie de bandes de pantographe ». La bonne chaîne doit être démontrée : grade carbone → matières de départ → procédé de fabrication → fournisseur → qualification réseau. Le terme « carbone » ne permet pas, à lui seul, de conclure à l'origine naturelle ou synthétique du graphite utilisé.

Cas O&M : la bande est un consommable fonctionnellement indispensable. Son risque dépend de la consommation kilométrique, du stock de sécurité, du nombre de grades homologués, du temps de qualification d'un nouveau fournisseur et de la possibilité de modifier les paramètres d'exploitation pendant une tension d'approvisionnement.

Lecture matière du cas pantographe — éviter l'assimilation automatique « carbone = graphite naturel ».

Niveau	Exemple / lecture	Preuve requise
Produit fini	Bande de contact de pantographe	Référence produit / homologation réseau
Famille de matériau	Carbone ; carbone-cuivre selon grade	Fiche technique fabricant
Constituants possibles	Graphite naturel ou synthétique, coke, liant/résine, cuivre, selon formulation	Fiche matière, formulation ou certificat fournisseur
Conclusion autorisée	La dépendance au graphite naturel ne peut être affirmée qu'après identification du grade et de sa formulation	Traçabilité matière-fournisseur

La résilience ne relève pas uniquement de la matière : elle dépend aussi de la profondeur du support industriel. À titre d'exemple, Mersen indique pouvoir proposer pendant plus de 15 ans les pièces nécessaires à la maintenance préventive et corrective de ses dispositifs de captage [23]. Cette déclaration constitue un horizon de support fournisseur, et non une garantie générale de disponibilité de toutes les matières ou de tous les grades carbone.

6.2 Cas B — Terres rares et moteurs de traction

L'AIE estime qu'en 2024 la Chine représentait environ 60 % de l'extraction mondiale des terres rares pour aimants, 91 % de leur raffinage et 94 % de la production d'aimants permanents frittés [2]. En avril 2025, des contrôles à l'exportation ont entraîné des difficultés d'approvisionnement dans plusieurs secteurs industriels [2].

L'AIE précise que les aimants NdFeB haute performance sont principalement composés de néodyme et de praséodyme, avec souvent du dysprosium et du terbium comme additifs améliorant les performances [2]. Cette composition explique pourquoi une tension sur une terre rare lourde peut affecter un aimant même lorsque le néodyme lui-même reste disponible.

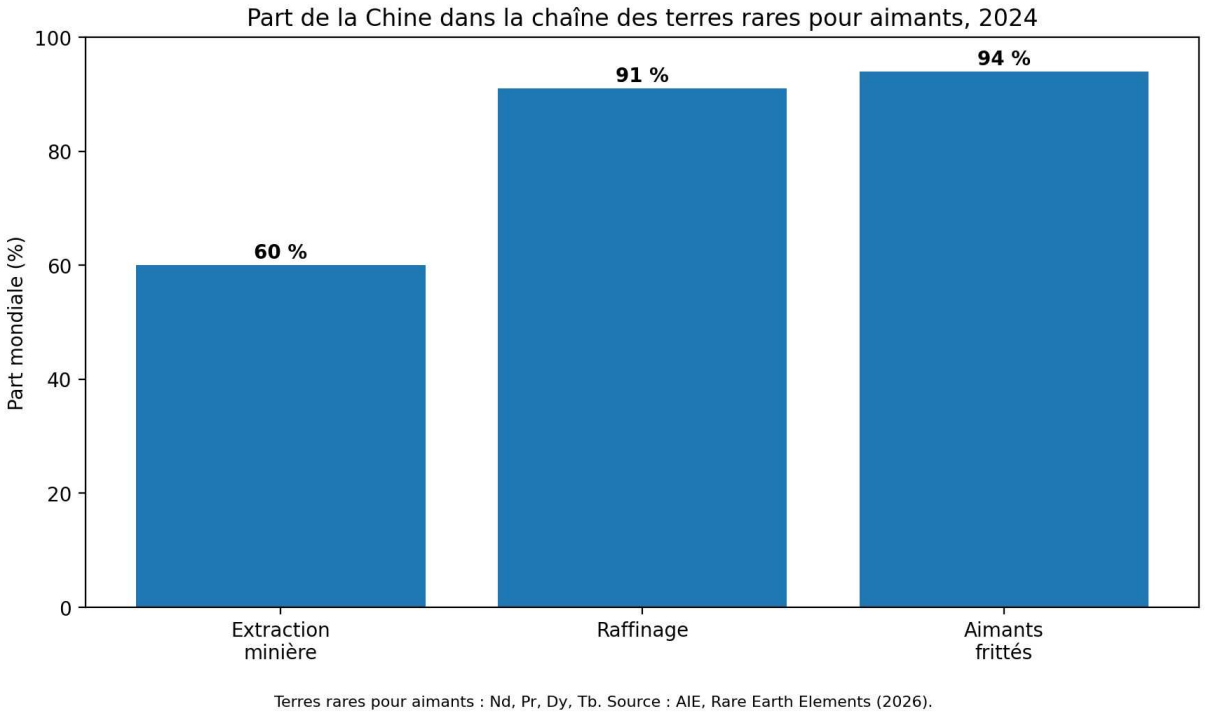


Figure 7 — Concentration de la chaîne des terres rares pour aimants en 2024

Traçabilité : IEA, Rare Earth Elements, Executive Summary, 2026 [2]. Données brutes utilisées : Chine ≈60 % de l'extraction des terres rares pour aimants, 91 % du raffinage et 94 % de la production d'aimants permanents frittés en 2024. Figure reconstruite par l'auteur. Consultation : 25 août 2026.

Le lien avec le ferroviaire est directement établi par Alstom, qui indique utiliser des aimants à terres rares dans certains moteurs de traction et étudier des technologies limitant l'usage d'aimants permanents [6]. Une revue de 2022 sur les topologies de moteurs de traction ferroviaires apporte un contexte technique plus large sur les architectures à aimants permanents et à réluctance pour la traction distribuée [12]. Mitsubishi Electric fournit un contre-exemple technologique particulièrement instructif : son système SynTRACS utilise un moteur synchrone à réluctance dont le rotor ne contient ni aimants permanents ni terres rares ; la production commerciale a démarré au cours de l'exercice clos en mars 2025 [9].

Ce cas montre que la résilience peut notamment être améliorée au stade de l'architecture produit. Pour l'O&M, le sujet est toutefois plus complexe : un exploitant ne peut pas substituer un moteur ou un rotor par une autre technologie sans redesign, validation système et parfois nouvelle homologation.

6.3 Cas C — Cuivre, transformateurs et CFO

Alstom relie explicitement la hausse du prix du cuivre à la fabrication de composants ferroviaires tels que les transformateurs et indique avoir développé des transformateurs pouvant utiliser de l'aluminium à la place du cuivre [6]. Cette déclaration est importante car elle fournit une preuve directe que la supply chain matière influence déjà les choix de conception ferroviaire.

Pour l'exploitant, la substitution a posteriori reste conditionnée à la compatibilité électrique, thermique, mécanique et documentaire de l'équipement. Le risque O&M se situe donc moins dans le prix spot du cuivre que dans la capacité à maintenir des pièces lourdes, des bobinages, des câbles ou des équipements remplaçables à long cycle industriel.

6.4 Cas D — Batteries lithium-ion

Hitachi Rail documente l'usage de cellules lithium-ion modulaires dans ses trains à batteries et hybrides [8]. Les impacts matière dépendent toutefois de la chimie de cellule : toutes les batteries lithium-ion n'utilisent pas le

même niveau de nickel, cobalt ou manganèse. Une analyse scientifique doit donc descendre jusqu'à la chimie, au fabricant de cellule et à l'architecture du pack.

Le risque O&M comprend la durée de disponibilité des cellules compatibles, les contraintes BMS, le vieillissement calendaire, le remplacement du pack, les règles de transport et stockage, la reparabilité, le recyclage et la garantie d'approvisionnement sur une durée de vie ferroviaire pouvant dépasser plusieurs générations de cellules.

6.5 Cas E — SiC et électronique de puissance

Europe's Rail documente des démonstrateurs de systèmes de traction utilisant des modules SiC 3,3 kV/800 A et des convertisseurs de traction à carbure de silicium [10]. La littérature scientifique décrit également des convertisseurs tout-SiC pour transport léger et des comparaisons Si/SiC pour convertisseurs ferroviaires [13].

Ce cas montre pourquoi la notion de « matière première » est insuffisante. Le goulet d'étranglement peut se trouver dans le wafer, le procédé de fabrication, le packaging haute puissance, le fabricant du module ou la qualification du composant. L'unité d'analyse doit donc être élargie aux composants critiques.

7. Proposition du Railway Material & Component Vulnerability Index (RMCVI)

Le RMCVI est proposé comme cadre de screening exploratoire permettant de hiérarchiser les vulnérabilités de maintenance. Il ne constitue ni une norme, ni une méthode de certification, ni un indicateur prédictif validé. Sa valeur scientifique dépendra d'une validation empirique, d'une pondération transparente et d'un calibrage sur des cas industriels.

Dimension	Définition opérationnelle
U — Upstream Supply Risk	Concentration minière/raffinage, restrictions d'exportation, équilibre offre-demande, gouvernance, exposition régionale.
D — Functional Dependency	Indispensabilité du composant pour la fonction ferroviaire ; conséquences sur disponibilité, sécurité, capacité de transport, mode dégradé et contraintes réglementaires/certification.
NS — Non-Substitutability Risk	Risque lié à l'absence, à la faible maturité ou à la non-qualification d'une matière, d'un fournisseur ou d'une technologie alternative.
Q — Qualification Rigidity	Temps, essais, homologation, sécurité, compatibilité, documentation nécessaires avant substitution.
L — Logistics Exposure	Lead time, mono-sourcing, profondeur de chaîne, capacité de réparation et stock disponible.

Dans cette première version, les impacts sécurité, disponibilité, capacité de transport et contraintes réglementaires ou de certification sont intégrés à la dimension D — Functional Dependency afin d'éviter un double comptage et de conserver un modèle parcimonieux.

$$\mathbf{RMCVI = 100 \times (wU \cdot U + wD \cdot D + wNS \cdot NS + wQ \cdot Q + wL \cdot L),\ \ avec\ \ \Sigma wi = 1}$$

Les dimensions U, D, NS, Q et L sont d'abord scorées sur une échelle ordinale 0–3, puis normalisées par X_normalisé = X_score / 3 avant pondération. Les poids ne doivent pas être fixés par convenance : une campagne Delphi peut stabiliser les critères, puis une AHP formaliser les comparaisons par paires et tester la cohérence des jugements d'experts [16,17]. Les dimensions ne sont pas supposées statistiquement indépendantes ; le protocole de validation devra tester les corrélations et le risque de double comptage, notamment entre D, NS et Q. Aucun seuil universel de « vulnérabilité forte » n'est revendiqué dans cette version. Parce que les notes 0–3 constituent des catégories ordinales de screening, leur agrégation pondérée doit être considérée comme une heuristique pragmatique et non comme une mesure sur une échelle d'intervalle. Le résultat doit servir à la comparaison, au tri et à l'analyse de sensibilité, et non être interprété comme une grandeur physiquement mesurée ni comme une distance cardinale précise entre composants.

Le score global doit être interprété avec une seconde sortie distincte : Impact opérationnel (sécurité, disponibilité, capacité de transport, conformité/certification et caractère essentiel du service). Ainsi, une chaîne très vulnérable peut avoir un impact opérationnel limité, tandis qu'une vulnérabilité moyenne peut concerner une fonction à conséquence très élevée.

7.1 Exemple de grille de scoring à valider

Score	U — risque amont	D — dépendance fonctionnelle	NS — non-substituabilité	Q — qualification	L — logistique
0	Diversifié, aucune restriction significative	Fonction non critique ; impact sécurité/disponibilité et service essentiel négligeable	Alternative immédiate et qualifiée	Aucune requalification	Multi-source, stock élevé
1	Concentration modérée	Impact limité ; mode dégradé robuste ; continuité du service préservée	Alternative qualifiée disponible	Validation documentaire courte	Lead time faible
2	Concentration élevée	Impact significatif sur disponibilité/capacité, certification ou continuité d'un service essentiel ; mode dégradé limité	Alternative connue mais non qualifiée	Essais/validation significatifs	Lead time moyen / mono-source partiel
3	Très forte concentration / restrictions	Fonction indispensable ; enjeu sécurité, indisponibilité majeure ou interruption d'un service essentiel ; pas de mode dégradé acceptable	Pas d'alternative mature ou qualifiable à court terme	Redesign ou homologation lourde	Mono-source, faible couverture de stock

Important
Cette échelle est une proposition de protocole, pas un résultat. Les seuils devront être calibrés sur des cas réels et faire l'objet d'une analyse de sensibilité.

7.2 Exemple de calcul — illustration uniquement

Pour démontrer le calcul sans présenter de scores industriels non étayés, considérons un composant hypothétique recevant provisoirement U=3, D=3, NS=2, Q=2 et L=3, avec des poids égaux w=0,20, retenus ici uniquement à des fins didactiques et sans préjuger de la future pondération Delphi/AHP. Après normalisation, les valeurs sont 1,00, 1,00, 0,67, 0,67 et 1,00 ; le RMCVI obtenu est 86,7/100. Il s'agit uniquement d'un exemple

didactique : ce score n'est attribué ni à une bande de pantographe, ni à un aimant de traction, ni à un module SiC, et ne constitue pas un résultat empirique.

Pour les trois familles de cas ci-dessous, les sources documentaires actuelles permettent de décrire la chaîne composant–matière, mais pas de publier un score RMCVI défendable. Les données industrielles manquantes sont donc explicitées plutôt qu'inventées.

Famille de cas	Éléments documentés dans cette publication	Données manquantes avant un score RMCVI défendable
Bande de contact de pantographe	Grades carbone/cuivre ; pertinence de l'usure ; déclaration de support fournisseur à long terme	Grade/formulation homologué ; nombre de sources qualifiées ; stock ; lead time ; durée de qualification ; possibilités de réparation/substitution
Moteur de traction à aimants permanents	Usage d'aimants à terres rares dans certains moteurs ; concentration amont ; existence d'une architecture moteur alternative	Composition exacte de l'aimant ; politique de rechange moteur/rotor ; topologie fournisseurs ; stock ; lead time ; durée de redesign et réautorisation
Convertisseur de traction SiC	Usage ferroviaire de modules SiC 3,3 kV / 800 A et technologie de convertisseur tout-SiC	Référence exacte module/BOM ; fournisseurs qualifiés ; réparabilité ; stock ; lead time ; contraintes de substitution et qualification

7.3 Du RMCVI à la conséquence stratégique

Le RMCVI reste volontairement un indice de vulnérabilité O&M. Il ne prétend pas mesurer la souveraineté d'un État. Après le scoring, une seconde lecture qualitative doit toutefois déterminer si le composant concerné soutient une fonction de mobilité essentielle, si la perturbation est absorbable par les redondances et modes dégradés, et si les capacités de réparation, de substitution ou d'approvisionnement peuvent être mobilisées dans un horizon compatible avec la continuité du service.

Cette séparation est importante : une matière peut être très vulnérable sans conséquence stratégique pour un réseau donné ; inversement, une pièce faiblement coûteuse et consommée en très petite quantité peut devenir stratégique si son absence immobilise une fonction ferroviaire critique pendant une durée supérieure aux marges disponibles.

8. Dimension temporelle : stock coverage vs. recovery time

Un réseau ne devient pas nécessairement indisponible le jour où une mine ou un exportateur est perturbé. Entre le choc amont et l'impact opérationnel existent des stocks de matière, composants finis, stocks OEM, stocks exploitant, possibilités de réparation et stratégies de substitution. Il faut donc introduire explicitement le temps.

Stock coverage (mois) = Stock utilisable / consommation moyenne mensuelle

Trecovery = Tprocurement + Tindustrialisation + Tqualification + Tinstallation

Condition de vulnérabilité forte : Trecovery > Tstock_coverage

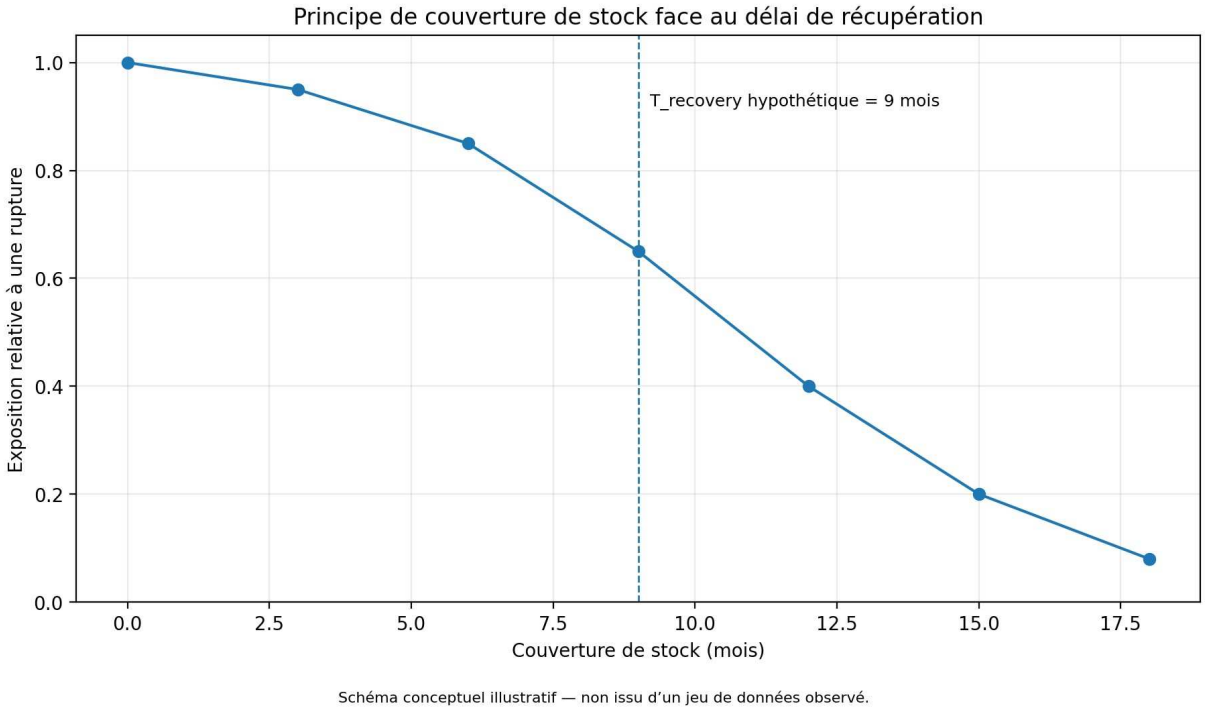


Figure 8 — Principe de comparaison entre couverture de stock et délai de récupération

Traçabilité : schéma conceptuel de l'auteur. Aucune donnée observée. La condition T_recovery > T_stock coverage est un test de screening pour consommables/flux réguliers et ne remplace pas une modélisation probabiliste des pièces lentes ou réparables.

Pour les pièces à très faible consommation, la consommation moyenne est insuffisante. Le cadre distingue donc deux régimes : (1) consommables à rotation régulière, pour lesquels la couverture de stock reste pertinente ; (2) pièces d'assurance, réparables critiques ou à faible rotation, pour lesquelles l'analyse doit intégrer probabilité de panne, population d'équipements exposés, nombre de rechanges disponibles, taux de réparation, délai de repair loop, cannibalisation, durée de vie résiduelle de la flotte et délai maximal acceptable d'indisponibilité.

9. Intégration RAMS, disponibilité et coût du cycle de vie

9.1 Disponibilité

Une tension d'approvisionnement agit principalement sur les temps de rétablissement et la probabilité de stock-out. Dans un système redondant, l'effet peut rester invisible jusqu'à la perte d'un second équipement ; dans un système sans redondance ou sur une pièce de flotte commune, l'effet peut se propager à plusieurs unités.

$$A \approx MTBF / (MTBF + MDT)$$

Cette expression simplifiée illustre le mécanisme : si le MDT augmente fortement sous l'effet d'un délai logistique, la disponibilité diminue sans modification du MTBF. Pour un cas réel, la modélisation devra intégrer redondance, cannibalisation, repair loop, configuration de flotte et restrictions opérationnelles.

9.2 LCC et volatilité

Le coût du cycle de vie est exposé à plusieurs mécanismes : hausse du prix matière, primes de sécurisation, achats de stock stratégique, qualification de deuxième source, redesign, obsolescence et coûts d'indisponibilité.

Les effets ne sont pas toujours négatifs : une substitution peut réduire masse, consommation ou coûts, comme l'illustre l'exemple Alstom cuivre/aluminium [6].

9.3 Circularité et réparation

Le recyclage et le reconditionnement réduisent la dépendance aux matières primaires mais n'annulent pas les contraintes de qualification. L'AIE souligne que le recyclage peut réduire à long terme les besoins de nouvelles mines pour plusieurs matières énergétiques [18]. Pour le ferroviaire, la priorité pratique est souvent la prolongation de vie du composant : réparation de cartes, rebobinage, reconditionnement de sous-ensembles, récupération de pièces et gestion maîtrisée des lifetime buys.

10. Méthode documentaire et protocole de validation proposé

Pour renforcer la reproductibilité de cette publication et permettre sa consolidation sur données industrielles, le protocole proposé comprend six phases. Il distingue ce qui est déjà étayé par des sources publiques de ce qui nécessitera, dans une phase ultérieure, des BOM, historiques O&M et données fournisseurs.

Phase	Méthode	Données	Livrable
P1	Revue systématique (consolidation future)	Scopus, WoS, IEEE, ScienceDirect, Springer + sources institutionnelles	Corpus et grille PRISMA adaptée
P2	Décomposition fonctionnelle	Architecture train/infrastructure, fonctions CFO, traction, signalisation	Taxonomie sous-systèmes
P3	BOM / fiches matière	Nomenclatures OEM, certificats matière, fiches techniques	Graphe composant → matière
P4	Supply chain	Pays extraction/raffinage, fournisseurs, lead times, restrictions	Carte des dépendances
P5	Delphi + AHP	Panel exploitants, mainteneurs, OEM, supply-chain	Poids et seuils RMCVI
P6	Validation	Stocks, pannes, consommations, scénarios de rupture	Backtesting et analyse de sensibilité

10.1 Méthode de revue documentaire

La présente version repose sur une revue documentaire exploratoire combinant des sources institutionnelles, normatives, industrielles et académiques. Les sources ont été retenues selon quatre critères : pertinence ferroviaire, traçabilité de l'information, caractère primaire ou institutionnel lorsque possible, et capacité à relier explicitement la matière au composant ou au risque de maintenance. Cette démarche ne constitue pas encore une revue systématique PRISMA ; une telle revue est proposée comme étape de consolidation ultérieure.

Les phases P2 à P6 ci-dessous n'ont pas été exécutées dans ce document de travail ; elles définissent le programme proposé de consolidation et de validation empirique.

10.2 Panel expert cible

Un panel initial de 20 à 40 experts pourrait constituer une base pragmatique pour une première phase Delphi, sous réserve de saturation des réponses, de représentation équilibrée des catégories d'acteurs et de stabilité des résultats. Cette plage n'est pas présentée comme une taille universelle obligatoire. Le panel devrait couvrir maintenance matériel roulant et infrastructure, CFO/traction, supply chain, pièces de rechange, RAMS, composants, OEM et obsolescence, avec une diversité géographique suffisante pour limiter les biais.

10.3 Données industrielles minimales

- référence et fonction du composant
- quantité installée par rame/installation
- stock exploitable et stock en quarantaine
- consommation annuelle et historique de pannes
- lead time nominal, maximum et observé
- nombre de fournisseurs qualifiés
- temps moyen de réparation
- existence d'une alternative et état de qualification
- durée contractuelle de disponibilité
- événements d'obsolescence et lifetime buys
- impact opérationnel d'un stock-out

11. Scénarios de stress proposés et protocole expérimental

Les scénarios S0 à S6 sont des conditions d'essai proposées et non des résultats observés sur un réseau en exploitation. Ils sont destinés à une analyse de sensibilité ultérieure lorsque les données composant, stock, panne et lead time seront disponibles.

Scénario	Choc	Variable principale	Sorties à mesurer
S0 — Base	Aucune perturbation	Lead time nominal	Coût, stock, disponibilité de référence
S1 — Prix	Prix ×2 ou ×3	Coût unitaire	LCC, budget maintenance
S2 — Lead time	Lead time ×2	Tprocurement	Risque de stock-out
S3 — Fournisseur	Arrêt 6 mois du fournisseur principal	Capacité alternative	Stock coverage, cannibalisation
S4 — Export	Restriction pays dominant 12 mois	Supply amont	Délai de rupture, coût premium
S5 — Obsolescence	Fin de production définitive	Trecovery	Redesign, qualification, lifetime buy
S6 — Double choc	Obsolescence + restriction matière	Corrélation	Résilience système et délai de retour

Une simulation Monte Carlo peut être ajoutée lorsque les distributions de lead time, de consommation et de panne sont connues. L'objectif ne serait pas de prédire une pénurie géopolitique, mais de mesurer la sensibilité du système de maintenance à des perturbations plausibles.

12. Implications O&M, contractuelles et stratégiques

12.1 Politique de stock

La segmentation ABC traditionnelle par valeur doit être complétée par une segmentation de résilience. Une pièce peu coûteuse mais non substituable peut nécessiter un stock stratégique supérieur à ce que suggère sa valeur. Il convient de distinguer stock économique, stock de sécurité opérationnelle et stock de résilience stratégique.

12.2 Dual sourcing et qualification anticipée

L'option la plus robuste n'est pas toujours d'augmenter le stock. Pour certaines pièces, la qualification anticipée d'une seconde source réduit davantage le Trecovery. Alstom indique d'ailleurs développer un réseau de fournisseurs réparti sur plusieurs continents afin de réduire l'exposition à des blocages commerciaux [6].

12.3 Exigences contractuelles

- durée garantie de disponibilité des pièces et composants
- notification anticipée d'obsolescence
- identification des single-source items critiques
- droit d'accès aux nomenclatures pertinentes et fiches matière
- second source qualifiée ou plan de qualification
- obligations de stock fournisseur et délais maximaux
- droits de réparation, données techniques et outillages
- gestion du redesign et partage des coûts
- lifetime buy et fin de vie
- recyclage, reprise et circularité des matières critiques

12.4 Gouvernance de résilience et autonomie stratégique

Pour les actifs qui soutiennent une fonction de mobilité essentielle, la résilience doit être gouvernée comme une capacité d'exploitation et non comme une simple politique d'achat. L'exploitant-mainteneur devrait disposer d'une cartographie des dépendances critiques, identifier les références mono-sourcées, connaître les délais de requalification, maintenir des capacités de réparation pertinentes et définir les stocks stratégiques à partir du délai de récupération plutôt que de la seule consommation historique.

À l'échelle d'un pays ou d'un grand réseau, les mesures les plus structurantes sont la diversification géographique des sources, la qualification anticipée de fournisseurs alternatifs, la maîtrise des données techniques et droits de réparation, le maintien de capacités régionales de reconditionnement, la circularité, les lifetime buys maîtrisés et des clauses contractuelles imposant l'alerte d'obsolescence et la continuité de support. L'objectif n'est pas de produire localement chaque composant, mais d'éviter qu'un maillon unique, extérieur et non substituable puisse durablement neutraliser une fonction essentielle.

13. Discussion, limites et agenda de recherche

13.1 Limites actuelles

- Absence de BOM ferroviaires détaillées et publiques : de nombreuses compositions ne peuvent être établies qu'avec les OEM.
- Les données macroéconomiques décrivent une matière ou un pays, pas la disponibilité d'un grade ferroviaire spécifique.
- Les prix ne constituent pas une mesure directe de pénurie physique.
- Les architectures diffèrent fortement entre constructeurs, générations de matériel et tensions d'alimentation.
- La substitution peut être techniquement possible mais économiquement ou réglementairement lente.
- Les effets de la cannibalisation, de la réparation et des stocks mutualisés doivent être modélisés séparément.
- Le RMCVI reste un cadre de screening exploratoire ; ses poids, seuils et performances de classement doivent encore être calibrés et validés sur des données industrielles.

13.2 Contribution proposée

L'originalité recherchée ne serait pas de démontrer que les matières critiques existent — ce résultat est déjà établi — mais de formaliser la traduction de cette criticité en risque de maintenance ferroviaire. La contribution pourrait être une méthode permettant de classer des couples composant-matière en fonction de leur capacité à générer un stock-out ou une augmentation du MDT.

13.3 Hypothèses à tester

Hypothèse	Énoncé
H1	La concentration géographique seule prédit mal la criticité O&M sans variables de substitution et qualification.
H2	La rigidité de qualification est un multiplicateur majeur du risque d'approvisionnement.
H3	Les consommables rapides et les pièces d'assurance lentes nécessitent des politiques de résilience différentes.
H4	Une politique de stock basée uniquement sur la consommation historique sous-estime les chocs systémiques.
H5	Le classement macroéconomique des matières diffère du classement par criticité ferroviaire fonctionnelle.
H6	Le dual sourcing qualifié peut réduire le risque plus efficacement qu'un stock supplémentaire au-delà d'un certain horizon.

14. Conclusion

La vulnérabilité des chaînes de matières et composants critiques apparaît comme un sujet industriel de plus en plus concret. Les données 2025–2026 montrent simultanément concentration du raffinage, multiplication des restrictions commerciales, divergences de prix et stratégies de substitution chez des industriels ferroviaires [1,2,6]. L'AIE place désormais les minerais critiques au cœur des agendas de sécurité économique et nationale [1], tandis que le cadre européen traite à la fois la sécurité d'approvisionnement des matières et la résilience du secteur ferroviaire comme des enjeux structurants [20,24].

Pour l'exploitant-mainteneur, le sujet ne doit cependant jamais être réduit à « minerai critique = pièce indisponible ». Il faut démontrer la chaîne complète jusqu'à la fonction ferroviaire, mesurer les possibilités de réparation et de substitution, puis comparer la couverture de stock au délai de récupération et de qualification. Ce n'est qu'ensuite qu'il est légitime d'évaluer la conséquence sur un service essentiel et, le cas échéant, sur l'autonomie stratégique de la mobilité.

Conclusion directrice
La maintenance du futur ne devra plus seulement répondre à la question « quand cet équipement va-t-il tomber en panne ? ». Elle devra aussi répondre à « lorsque cette panne arrivera, disposerons-nous encore de la pièce, du matériau, du fournisseur, des données, des capacités de réparation et du délai de qualification nécessaires pour remettre le système en service ? ». Pour les fonctions de mobilité essentielles, cette capacité de rétablissement devient une composante concrète de la résilience nationale et de l'autonomie stratégique.

Cette publication propose un cadre exploratoire de caractérisation de la vulnérabilité des matières et composants critiques dans les systèmes ferroviaires. Sa contribution principale consiste à relier la criticité amont à l'exploitation-maintenance, au temps de rétablissement, à la disponibilité et, lorsque la fonction ferroviaire

concernée est essentielle, à la continuité stratégique des mobilités. Le RMCVI reste une hypothèse méthodologique à calibrer et valider sur des données industrielles : il n'est ni un indicateur normatif, ni une mesure de souveraineté, ni un modèle prédictif établi.

Annexe A — Liste UE des 34 matières premières critiques (évaluation 2023 ; statut stratégique aligné sur le règlement (UE) 2024/1252)

Note réglementaire : les dénominations et statuts sont alignés sur le règlement (UE) 2024/1252, annexes I et II. Toutes les matières stratégiques sont critiques, mais toutes les matières critiques ne sont pas stratégiques. Pour certaines familles, le statut stratégique dépend explicitement du grade ou de l'usage (p. ex. lithium, manganèse, graphite, nickel, bore, terres rares pour aimants) [20].

Matière critique (règlement UE 2024/1252)	Statut stratégique — annexe I
Antimoine	Critique uniquement
Arsenic	Critique uniquement
Bauxite / alumine / aluminium	Stratégique
Baryte	Critique uniquement
Béryllium	Critique uniquement
Bismuth	Stratégique
Bore / borates	Stratégique pour le bore de qualité métallurgique
Cobalt	Stratégique
Charbon à coke	Critique uniquement
Cuivre	Stratégique
Feldspath	Critique uniquement
Fluorine	Critique uniquement
Gallium	Stratégique
Germanium	Stratégique
Hafnium	Critique uniquement
Hélium	Critique uniquement
Terres rares lourdes	Partiellement stratégique: REE pour aimants (notamment Tb, Dy, Gd)
Terres rares légères	Partiellement stratégique: REE pour aimants (notamment Nd, Pr, Sm, Ce)
Lithium	Stratégique pour la qualité batterie
Magnésium	Stratégique pour le magnésium métal
Manganèse	Stratégique pour la qualité batterie
Graphite naturel	Statut stratégique lié au graphite de qualité batterie; voir annexe I du règlement
Nickel (battery grade)	Stratégique — qualité batterie
Niobium	Critique uniquement
Phosphate rock	Critique uniquement
Phosphore	Critique uniquement
Métaux du groupe platine	Stratégique
Scandium	Critique uniquement
Silicium métal	Stratégique
Strontium	Critique uniquement
Tantale	Critique uniquement
Titane métal	Stratégique
Tungstène	Stratégique
Vanadium	Critique uniquement

Cette annexe reproduit la liste de screening européenne. Elle ne signifie pas que les 34 matières sont présentes ou critiques dans un système ferroviaire donné. Toute utilisation ferroviaire doit être démontrée par une BOM, une fiche technique ou une source sectorielle [4].

Annexe B — Matrice de screening ferroviaire initial

Sous-système	Composant	Matière/famille	Preuve	Source minimale	Donnée à obtenir
Pantographe	Bande carbone	Carbone, cuivre selon grade	E3	Mersen + littérature usure	Consommation, stock, grades homologués
Captage 3e rail	Frotteur	Carbone/cuivre selon grade	E3	Mersen	Consommation, stock, fournisseurs
Traction	Moteur PM	Nd/Pr/Dy/Tb selon aimant	E3	AIE + Alstom	Type moteur, aimant, rechange rotor/moteur
Traction	Moteur SynRM	Pas de terres rares rotor	E3	Mitsubishi	Applicabilité retrofit limitée
Traction	Convertisseur	SiC	E3	Europe’s Rail + publications	Référence module, fournisseur, redesign
CFO	Transformateur	Cuivre ou aluminium	E3	Alstom	Architecture réelle, repair loop
CFO	Câbles/conducteurs	Cuivre/aluminium	E2/E3	Technologie établie	Nuances, sections, normes et fournisseurs
Stockage	Pack batterie	Li + chimie dépendante	E3/E2	Hitachi + chimie à confirmer	Cellule, cathode, BMS, pack
Signalisation	Cartes électroniques	Ga/Ge/In/Ta/Sn etc. possibles	E1	BOM requise	Références semi-conducteurs, obsolescence
Voie	Rails/alliages	V/Nb/Mn etc. selon nuance	E1	Certificat matière requis	Nuance exacte et sourcing
Roulement	Roues/essieux	Alliages selon spécification	E1	Certificat matière requis	Forge, fournisseur, qualification
Freinage	Garnitures/disques	Formulations propriétaires	E1	Fiche matériau requise	Composition et seconde source

Annexe C — Données brutes et reproductibilité des figures

Les figures quantitatives 1, 2, 3, 4 et 7 sont des reconstructions de l'auteur à partir de données institutionnelles ; les figures 5, 6 et 8 sont conceptuelles. Le tableau documente les valeurs utilisées afin de permettre leur reproduction.

Figure	Données brutes	Source exacte	Transformation	Statut
1	2011=14; 2014=20; 2017=27; 2020=30; 2023=34	JRC-RMIS [4]	Tracé direct	Reconstruction
2	Métaux de base env. +33 % ; lithium >+100 % ; cobalt env. +130 % ; tungstène ×6	IEA 2026, Executive Summary [1]	Indice Jan-2025=100: 133; ≥200; 230; 600	Reconstruction; pas un prix absolu
3	2023=70%; 2025=72%	IEA 2026, Executive Summary [1]	Tracé direct; hors terres rares	Reconstruction
4	10%; 40%; 25%; 65%	Règlement (UE) 2024/1252, art. 5 [20]	Seuils réglementaires	Reconstruction
5	Aucune	Modèle auteur	Schéma causal	Conceptuel
6	Aucune	Auteur + [20,24–27]	Schéma causal	Conceptuel
7	Extraction ≈60%; raffinage=91%; aimants frittés=94%	IEA Rare Earth Elements 2026 [2]	Parts 2024	Reconstruction
8	Aucune	Modèle auteur	Comparaison conceptuelle	Conceptuel

Bibliographie

Principe de sélection des sources
La bibliographie finale écarte les agrégateurs de marché, contenus non édités et billets de blog lorsque l'énoncé peut être étayé par une source institutionnelle, normative, scientifique ou industrielle primaire. Les chiffres non traçables sur les coûts de fabrication des bandes carbone et leur transmission automatique aux prix de vente n'ont pas été retenus.

Protocole de consolidation et de diffusion scientifique

Pour une diffusion scientifique plus large ou une soumission ultérieure à une revue, le corpus pourra être étendu aux bases Scopus, Web of Science et IEEE Xplore. Si l'article est alors présenté comme une revue systématique, la stratégie de sélection des publications devra être documentée (mots-clés, critères d'inclusion/exclusion, période, doublons) avec une méthode de type PRISMA. La présente version privilégie volontairement les sources institutionnelles, les normes, les publications scientifiques et les sources industrielles primaires permettant de vérifier les relations matière–composant et le contexte 2025–2026.

[1] International Energy Agency (IEA). (2026). Global Critical Minerals Outlook 2026. Paris: IEA. Published 16 July 2026. Key data used: Executive Summary (price developments; refining concentration) and Outlook (2035 copper supply balance). https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2026 (accessed 25 August 2026).

[2] International Energy Agency (IEA). (2026). Rare Earth Elements — Executive Summary. Paris: IEA. Data used: 2024 shares for magnet-rare-earth mining, refining and sintered permanent-magnet production. https://www.iea.org/reports/rare-earth-elements/executive-summary (accessed 25 August 2026).

[3] European Commission. (2026). Critical Raw Materials Act: securing sustainable supply chains for Europe. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en (accessed 25 August 2026).

[4] European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2026). Raw Materials Information System (RMIS) — EU Critical Raw Materials. JRC. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials (accessed 25 August 2026).

[5] U.S. Geological Survey (USGS). (2026). Mineral Commodity Summaries 2026. Reston, VA: U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2026 (accessed 25 August 2026).

[6] Alstom. (2026, 22 May). Resilience in railways: the art of developing future-proof trains in an uncertain world. Alstom. https://www.alstom.com/press-releases-news/2026/5/resilience-railways-art-developing-future-proof-trains-uncertain-world (accessed 25 August 2026).

[7] Mersen. (n.d.). Pantograph Contact Strips — Power Transfer for Rail. Mersen. https://www.mersen.com/en/products/power-transfer-products-rail/pantograph-contact-strips (accessed 25 August 2026).

[8] Hitachi Rail. (n.d.). Battery Commuter Trains. Hitachi Rail. https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/rolling-stock/battery-powered-trains/battery-commuter-trains/ (accessed 25 August 2026).

[9] Mitsubishi Electric. (2025, 3 October). Railcar Motor System Wins R&D 100 Award — SynTRACS. Mitsubishi Electric. https://www.mitsubishielectric.com/en/pr/2025/1003/ (accessed 25 August 2026).

[10] Europe's Rail Joint Undertaking. (2024). Towards more efficient, Silicon Carbide-based traction systems. Europe's Rail JU. https://rail-research.europa.eu/latest-news/towards-more-efficient-silicon-carbide-based-traction-systems/ (accessed 25 August 2026).

[11] Zhi, X., Zhou, N., Wei, H., Chen, H., Cheng, Y., Sun, Y., Zhao, L., Huang, G., et al. (2025). Analysis of the abnormal wear of the pantograph contact strip through combined experimental and simulation approaches. Scientific Reports, 15, Article 45706. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28380-0.

[12] Paul, S., et al. (2022). State-of-the-art review of railway traction motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway. Energy Reports, 8, 14623–14642. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.411.

[13] Yıldırım, D., Akşit, M. H., Çadırcı, I., & Ermiş, M. (2022). All-SiC Traction Converter for Light Rail Transportation Systems: Design Methodology and Development of 165 kVA Prototype. Electronics, 11(9), 1438. https://doi.org/10.3390/electronics11091438.

[14] Saad, E., Besbes, M., Bourgeois, V., Czmil, V., & Zolghadri, M. (2026; first online 4 October 2025). A New Hybrid Approach for Identifying Obsolescence Features: Applied to Railway Signaling Infrastructure. In Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility (TRAconference 2024), Lecture Notes in Mobility, pp. 174–180. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04774-8_26.

[15] Driessen, M. A., Arts, J. J., van Houtum, G.-J., Rustenburg, J. W., & Huisman, B. (2015). Maintenance spare parts planning and control: a framework for control and agenda for future research. Production Planning & Control, 26(5), 407–426. https://doi.org/10.1080/09537287.2014.907586.

[16] Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. Mathematical Modelling, 9(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8.

[17] Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). (1975). The Delphi Method: Techniques and Applications. Reading, MA: Addison-Wesley.

[18] International Energy Agency (IEA). (2024). Recycling of Critical Minerals — Executive Summary. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals/executive-summary (accessed 25 August 2026).

[19] King, J., & Gugala, O. (2018, 9 July). Effective Reliability, Availability, Maintainability (RAM) and Safety (S), Principles and Guidelines for Large Subsurface Metro and Main Line Projects. Crossrail Learning Legacy / ICE Publishing. https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/effective-reliability-availability-maintainability-ram-and-safety-s-principles-and-guidelines-for-large-subsurface-metro-and-main-line-projects/ (accessed 25 August 2026).

[20] European Parliament & Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials. Official Journal of the European Union, L, 2024/1252, 3 May 2024. Relevant provisions: Arts. 3–5, 20–24; Annex I; Annex II. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj (accessed 25 August 2026).

[21] International Energy Agency (IEA). (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025 (accessed 25 August 2026).

[22] British Standards Institution (BSI). (2024). BS EN 50126-1:2017+A1:2024, Railway applications — The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) — Part 1: Generic RAMS process. London: BSI.

[23] Mersen. (n.d.). Spare Parts — Power Transfer for Rail. Mersen. https://www.mersen.com/en/products/power-transfer-products-rail/spare-parts (accessed 25 August 2026).

[24] European Parliament & Council of the European Union. (2022). Directive (EU) 2022/2557 of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC. Official Journal of the European Union, L 333, 27 December 2022, pp. 164–198. Relevant rail scope: Annex, sector 5 (Transport), subsector rail. ELI: http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj (accessed 25 August 2026).

[25] European Railway Clusters Initiative (ERCI). (2023–2026). LEADER 2030 — Learnings for European Autonomy to Deliver Europe's Rail in 2030. Europe's Rail Joint Undertaking project, call HORIZON-ER-JU-2022-ExpIR-06. https://www.eurailclusters.com/erci_project/leader-2030/ (accessed 25 August 2026).

[26] European Railway Clusters Initiative (ERCI). (2026, 17 April). LEADER 2030 concluded with a final conference at the European Parliament: "From supply risks to strategic autonomy". Conference held 8 April 2026. ERCI. https://www.eurailclusters.com/leader-2030-concluded-with-a-final-conference-at-the-european-parliament/ (accessed 25 August 2026).

[27] General Secretariat of the Council of the European Union. (2026, 5 June). A strategic approach for the European railway industry. Note 10057/1/26 REV 1, TRANS 383, AOB for the Transport, Telecommunications and Energy Council meeting of 8 June 2026; information from Austria, Croatia, France, Germany, Greece, Italy, Luxembourg, Poland, Portugal and Romania. Brussels, pp. 1–3. Relevant passages: p. 1 on transport sovereignty, critical-infrastructure resilience and strategic autonomy; pp. 2–3 on security of supply and critical dependencies. https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10057-2026-REV-1/en/pdf (accessed 25 August 2026).

GI CONSULTING MOBILITY & ECOLOGICAL INNOVATION

مخاطر إمدادات المواد والمكونات الحرجة في قطاع السكك الحديدية

من قابلية تأثر سلسلة الإمداد إلى مرونة التشغيل والصيانة والسيادة التشغيلية لمنظومات التنقل: إطار الفرز الأولي

RMCVI

مستند عمل مستقل في البحث التطبيقي - إصدار بالإنجليزية والفرنسية والعربية - الإصدار 1.0 (الطبعة الثلاثية اللغات الأولى)

Issame Garchali

خبير CFO / طاقة الجر / الجهد العالي والمنخفض - التشغيل والصيانة

27 أغسطس 2026

DOI: 10.5281/zenodo.22127446

النسخة العربية - ترجمة كاملة للنسخة الإنجليزية المرجعية. هذا المستند المستقل في البحث التطبيقي مخصص للنشر المهني والاستكشاف العلمي. تم توثيق العلاقات بين المواد والمكونات؛ ويُعد *RMCVI* إطاراً أصلياً للفرز الأولي ما زال يحتاج إلى المعايرة والتحقق باستخدام بيانات صناعية. لم تخضع هذه النسخة لمراجعة الأقران.

تموضع المنشور

التموضع
يركز هذا المنشور المستقل على تشغيل وصيانة السكك الحديدية. ويدرس كيف يمكن لأوجه قابلية التأثر في أعلى سلسلة الإمداد - المادة الخام أو التكرير أو المكوّن أو المورد أو العملية أو التكنولوجيا - أن تزيد زمن الاستعادة، وتضعف أداء RAMS، وتعطل وظائف التنقل الأساسية. ويُستخدم مصطلحا «الاستقلالية الاستراتيجية» و«السيادة التشغيلية لمنظومات التنقل» بمعنى محدد ومقيد عمداً: قدرة الدولة ومشغليها على استمرار خدمات التنقل الحرجة من دون اعتماد خارجي مفرط على حلقات غير قابلة للاستبدال في سلسلة الإمداد. وهذا ليس دعوة إلى الاكتفاء الصناعي الذاتي، ولا يعني أن كل نقص في مادة ما يشكل تهديداً للسيادة.

يميز هذا المنشور بين ثلاث فئات من العبارات: (1) حقائق موثقة، (2) استنتاجات تقنية معقولة تدعمها عدة مصادر، و(3) فرضيات تتطلب التحقق باستخدام قوائم المواد (BOM)، والمخزونات، ومهل التوريد، وبيانات الصيانة. ويُعد هذا الفصل ضرورياً لتجنب تحويل قابلية تأثر محتملة إلى ادعاء غير مدعوم بوجود «نقص في السكك الحديدية».

الملخص التنفيذي

تزيد كهربة السكك الحديدية ورقمنتها وارتفاع متطلبات الأداء من الاعتماد على مواد ومكونات قد تكون سلاسل إمدادها شديدة التركّز جغرافياً، أو معرضة لقيود تجارية، أو تتطلب زمناً طويلاً للاستبدال والتأهيل. وتعتبر وكالة الطاقة الدولية أن عام 2025 شهد تجسداً واسع النطاق للمخاطر الاقتصادية المرتبطة بسلاسل إمداد المعادن شديدة التركّز، كما توثق ارتفاعات حادة في أسعار عدة مواد بين يناير 2025 وأبريل 2026 [1].

يتعرض قطاع السكك الحديدية مباشرة لعدة سلاسل موثقة: الكربون/النحاس في شرائح تماس البانتوغراف [7]، والمغناطيسات الدائمة المعتمدة على العناصر الأرضية النادرة في بعض محركات الجر [6]، والنحاس أو الألومنيوم في بعض محولات السكك الحديدية [6]، وخلايا الليثيوم-أيون في القطارات العاملة بالبطاريات [8]، ووحدات القدرة المصنوعة من كربيد السيليكون في محولات الجر [10،13].

تنقل هذه الدراسة وحدة التحليل من «حرجية المعدن» إلى حرجية السلسلة الوظيفية: مادة → معالجة → مكوّن → نظام فرعي → قطعة غيار → صيانة → توافر → استمرارية الخدمة الأساسية. وتقترح مؤشر قابلية تأثر المواد والمكونات في السكك الحديدية (RMCVI)، الذي يجمع بين مخاطر الإمداد الأولية، والاعتماد الوظيفي، ومخاطر عدم القابلية

للاستبدال، وصلابة التأهيل، والتعرض اللوجستي. ولا يُعد RMCVI معياراً أو أسلوب اعتماد أو مؤشراً تنبؤياً مُثبتاً؛ بل هو إطار استكشافي للفرز الأولي يحتاج إلى المعايرة على بيانات صناعية.

تتمثل الفرضية المركزية في أن كمية صغيرة جداً من مادة ما قد تُحدث أثراً تشغيلياً غير متناسب عندما تكون مدمجة في مكوّن لا غنى عنه وظيفياً، أحادي المصدر، صعب الاستبدال وبطيء التأهيل. ولذلك لا ينبغي للتشغيل والصيانة أن يسألا فقط متى قد يتعطل الأصل، بل أيضاً ما إذا كان المشغل يستطيع الحصول على الجزء المطلوب أو إصلاحه أو إعادة تأهيله قبل نفاد الهوامش اللوجستية. وعندما يدعم الأصل وظيفة نقل أساسية، تصبح المسألة مرتبطة بالمرونة الوطنية والاستقلالية الاستراتيجية في التنقل [20،24]. وهذه فرضية مفاهيمية ينبغي اختبارها على بيانات صناعية؛ ولا تدعي الورقة وجود علاقة كمية عالمية بين كتلة المادة وقابلية التأثر التشغيلية.

الكلمات المفتاحية: السكك الحديدية، المواد الخام الحرجة، سلسلة الإمداد، التشغيل والصيانة، RAMS، التوافر، التقادم، قطع الغيار، النحاس، الغرافيت، العناصر الأرضية النادرة، الليثيوم، SiC، الخدمات الأساسية، المرونة الوطنية، الاستقلالية الاستراتيجية.

المحتويات

1. المقدمة وإشكالية البحث

2. حالة الفن: الحرجية، والمرونة، والصيانة، والاستقلالية الاستراتيجية

3. سياق 2025-2026: التركّز، والأسعار، والقيود التجارية

4. من المادة إلى خدمة السكك الحديدية: النموذج السببي

5. رسم خريطة عائلات المواد والمكونات

6. دراسات حالة في السكك الحديدية

7. RMCVI المقترح والتفسير الاستراتيجي

8. البعد الزمني: تغطية المخزون مقابل زمن الاستعادة

9. RAMS والتوافر وتكلفة دورة الحياة

10. المنهج الوثائقي وبروتوكول التحقق المقترح

11. سيناريوهات الضغط المقترحة والبروتوكول التجريبي

12. الآثار التشغيلية والصيانية والتعاقدية والاستراتيجية

13. المناقشة والحدود وأجندة البحث

14. الخاتمة

الملحق أ - قائمة الاتحاد الأوروبي للمواد الخام الحرجة الـ34 (تقييم 2023؛ والحالة الاستراتيجية مواءمة مع اللائحة (EU) 2024/1252)

الملحق ب - مصفوفة الفرز الأولي للسكك الحديدية

المراجع

1. المقدمة وإشكالية البحث

تاريخياً، بُنيت سياسات صيانة السكك الحديدية حول موثوقية الأصول، وتوفير قطع الغيار، والصيانة الوقائية والتصحيحية، وقابلية الصيانة، وزمن استعادة الخدمة. ويظل هذا الإطار أساسياً، لكنه يفترض ضمنياً إمكانية الحصول على جزء أو مكوّن متوافق، أو إصلاحه أو استبداله، ضمن أفق زمني معقول.

يصبح هذا الافتراض أقل متانة عندما تعتمد السلسلة الصناعية على مادة تُكرر في عدد محدود من البلدان، أو على عملية متخصصة، أو ملكية فكرية يسيطر عليها المصنع الأصلي، أو مكوّن إلكتروني متقادم، أو عملية تأهيل طويلة خاصة بالسكك الحديدية. عندئذ لا يعود الخطر تقنياً فقط، بل يصبح صناعياً ولوجستياً وتعاقدياً وجيوسياسياً. وبالنسبة إلى بنية تحتية أساسية للتنقل، يمكن للاعتماد غير المُدار أن يؤثر أيضاً في قدرة الدولة على استمرار الخدمة أثناء اضطراب خارجي.

وعليه، فإن سؤال البحث المركزي هو: إلى أي مدى يمكن لاضطراب في إمداد المواد أو المكونات الحرجة أن ينتقل إلى قابلية صيانة نظام السكك الحديدية وتوافره التشغيلي، وأن يمتد - عندما تتأثر وظيفة أساسية - إلى مرونة منظومات التنقل واستقلاليتها الاستراتيجية؟

1.1 أسئلة البحث

RQ1 - التحديد: ما المواد والمكونات الموجودة فعلياً في الأنظمة الفرعية للسكك الحديدية، وما مستوى الدليل على ذلك؟

RQ2 - الانتقال: عبر أي حلقات يمكن لاضطراب في أعلى سلسلة الإمداد أن يصل إلى الصيانة ثم إلى الخدمة؟

RQ3 - الزمن: ما المدة الفاصلة بين صدمة الإمداد وظهور عجز في التوافر داخل ورشة أو نظام بنية تحتية؟

RQ4 - التضخيم: ما العوامل التي تضخم الخطر - المصدر الوحيد، مهلة التوريد، انخفاض المخزون، التقادم، صرامة التأهيل، ضعف قابلية الإصلاح أو الاعتماد على المصنع الأصلي؟

RQ5 - المرونة والاستقلالية الاستراتيجية: ما تدابير التشغيل والصيانة - المخزون الاستراتيجي، تعدد المصادر، إعادة التصميم، الاستبدال، الإصلاح، التجديد، إعادة التدوير، الوصول إلى البيانات، والبنود التعاقدية - الأكثر فاعلية في تقليل الاعتماديات القادرة على التأثير في خدمة أساسية؟

1.2 الفرضية المركزية

الفرضية المركزية
لا تتناسب حرجية التشغيل والصيانة مع كتلة المادة داخل النظام. بل تنتج عن التأثير المجمع لمخاطر الإمداد الأولية، والأهمية الوظيفية، وتركّز الموردين، وعدم القابلية للاستبدال، والتعرض اللوجستي، وزمن التأهيل. ولذلك قد تكون بضعة غرامات داخل مكوّن غير قابل للاستبدال أكثر حرجية للتوافر من أطنان من مادة متاحة على نطاق واسع. وعندما يدعم المكوّن وظيفة نقل أساسية، قد تتحول قابلية التأثر في التشغيل والصيانة إلى مسألة مرونة وطنية.

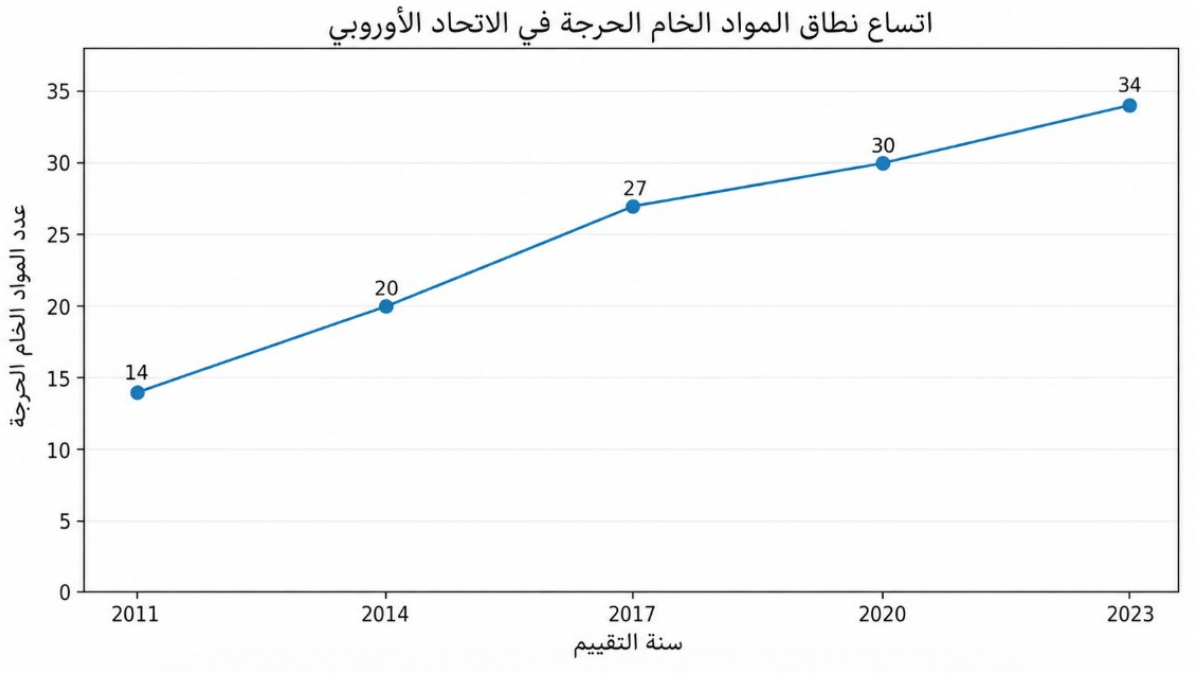
2. حالة الفن: الحرجية، والمرونة، والصيانة، والاستقلالية الاستراتيجية

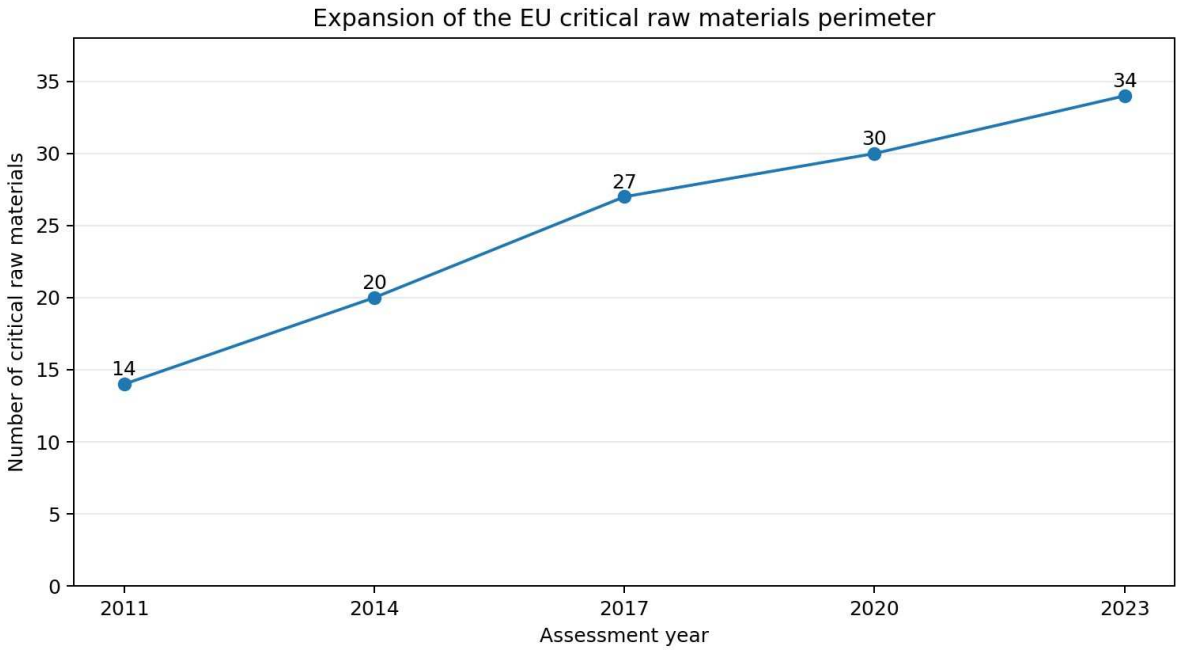
2.1 حرجية المواد: المقاربة الاقتصادية الكلية

يقيم الاتحاد الأوروبي حرجية المواد بالاستناد إلى أبعاد مثل الأهمية الاقتصادية ومخاطر الإمداد، بما يشمل التركّز الجغرافي، والحوكمة، والاعتماد على الواردات، وقابلية الاستبدال، وإعادة التدوير. وتضم قائمة 2023 ما مجموعه 34 مادة خام حرجة، فيما يحدد قانون المواد الخام الحرجة المواد الخام الاستراتيجية ويضع مؤشرات للتنويع حتى عام 2030 [3،4،20].

تستخدم وكالة الطاقة الدولية مقاربة ذات صلة بقطاع الطاقة والتكنولوجيات الاستراتيجية، فتدرس تركّز الإمداد، وتوازن العرض والطلب، والقيود التجارية، وقابلية الاستبدال، والأهمية القطاعية. ويشير تقريرها لعام 2026 إلى أن مخاطر التركّز انتقلت في 2025 من قابلية تأثر نظرية إلى مخاوف فورية تتعلق بالأمن الاقتصادي [1].

تُستخدم نشرة Mineral Commodity Summaries 2026 الصادرة عن هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية كتحقق مستقل من السياق الحالي للإنتاج والاحتياطيات المعدنية؛ وهي ليست مصدر بيانات الأسعار أو توقعات توازن العرض لعام 2035 الصادرة عن وكالة الطاقة الدولية والمستخدمة في هذه الورقة [5].





الشكل 1 - اتساع نطاق المواد الخام الحرجة في الاتحاد الأوروبي

التتبّع: قوائم JRC-RMIS / المفوضية الأوروبية للمواد الخام الحرجة للأعوام 2011 و2014 و2017 و2020 و2023 [4].

القيم الخام المستخدمة: 14، 20، 27، 30 و34 مادة/عائلة. سلسلة زمنية أعاد المؤلف بناءها؛ لم تُضف أي بيانات أسعار أو تقديرات. تاريخ الاطلاع: 25 أغسطس 2026.

2.2 الأعمال القائمة في قطاع السكك الحديدية بشأن الاعتماديات والاستقلالية

سبق لعدة مبادرات أوروبية أن حددت اعتماد قطاع السكك الحديدية على المواد الخام والمكونات والتكنولوجيات الحرجة. ويقوم مشروع LEADER 2030 (Learnings for European Autonomy to Deliver Europe's Rail in 2030)، الممول في إطار Europe's Rail Joint Undertaking، برسم خريطة اضطرابات الإمداد واحتياجات التكنولوجيا لعام 2030 واستقلالية المواد الخام والاختناقات والفجوات [25]. وعُقد مؤتمره الختامي في البرلمان الأوروبي في 8 أبريل 2026؛ ونشرت ERCI تقرير المؤتمر في 17 أبريل 2026، رابطاً صراحةً بين مخاطر الإمداد والمرونة والاستقلالية الاستراتيجية في السكك الحديدية الأوروبية [26].

تصف مذكرة معلومات مؤرخة في 5 يونيو 2026، قدمتها النمسا وكرواتيا وفرنسا وألمانيا واليونان وإيطاليا ولوكسمبورغ وبولندا والبرتغال ورومانيا ضمن بند «مسائل أخرى» في اجتماع مجلس النقل والاتصالات والطاقة بتاريخ 8 يونيو 2026، صناعة السكك الحديدية الأوروبية بأنها أصل استراتيجي، وتربط مرونة السكك الحديدية بسيادة النقل ومرونة

البنية التحتية الحرجة والاستقلالية الاستراتيجية، مع الدعوة إلى تحليل الاعتماديات الحرجة [27]. وهي مذكرة معلومات مقدمة من هذه الدول الأعضاء، وليست موقفاً اعتمده المجلس رسمياً.

تموضع المساهمة: لا تدعي هذه الورقة اكتشاف اعتماد السكك الحديدية على المواد الحرجة. وتتمثل مساهمتها المقترحة في الصياغة الموجهة للتشغيل والصيانة للسلسلة السببية - مادة → مكوّن → صيانة → MDT/التوافر → خدمة أساسية - إلى جانب إطار الفرز الاستكشافي RMCVI.

النطاق الجغرافي: تستند الأدلة التنظيمية وجزء كبير من الأدلة الصناعية في هذه النسخة أساساً إلى مصادر أوروبية، مع استكمالها بمصادر صناعية يابانية. ويُراد للإطار أن يكون قابلاً للنقل خارج أوروبا، لكن لا يُدعى أنه قابل للتطبيق عالمياً من دون إعادة معايرته وفق التنظيمات المحلية، وهياكل الموردين، وتقنيات الأساطيل، وممارسات الصيانة، والاعتماديات الجيوسياسية.

2.3 حدود المقاربة الاقتصادية الكلية بالنسبة إلى التشغيل والصيانة في السكك الحديدية

قد تكون مادة ما حرجة للاقتصاد الأوروبي لكنها غير مؤثرة لدى مشغل سكك حديدية معين؛ والعكس صحيح، فقد يكون مكوّن سككي حرجاً تشغيلياً حتى إن لم تتجاوز أي من مواده عتبة الحرجية الاقتصادية الكلية. ولذلك فإن وحدة التحليل الملائمة للتشغيل والصيانة هي زوج المكوّن-الوظيفة وسلسلة الاستبدال والإصلاح والتأهيل المرتبطة به.

يتسق هذا المنطق مع الأدبيات المتعلقة بقطع غيار السلع الرأسمالية، التي تفصل بين الطلب والإصلاح والمخزون ومخاطر التوقف، ومع أبحاث التقادم في السكك الحديدية التي تبرز التحديات الخاصة بالأصول الكهربائية والإلكترونية طويلة العمر [14،15].

تُميز هذه الورقة بين ثلاثة مصطلحات: الخطر = احتمال أو معقولية وقوع اضطراب مقترناً بعواقبه؛ قابلية التأثر = حساسية السلسلة أو النظام لذلك الاضطراب؛ الحرجية = أهمية المكوّن أو الوظيفة بالنسبة إلى النظام. يقيس RMCVI أساساً قابلية تأثر سلسلة الإمداد، ولا يُعد مقياساً كاملاً للمخاطر لأن احتمال الحدوث غير مدرج فيه صراحةً.

2.4 RAMS والدعم اللوجستي وسلسلة الإمداد

لا يغير اضطراب الإمداد بالضرورة MTBF الجوهري لأصل مركب. وقد يتمثل أثره الرئيسي في زيادة زمن التوقف بعد العطل من خلال إطالة زمن الشراء أو اللوجستيات أو الإصلاح أو إعادة التأهيل.

MDT = Tdiagnosis + Tmaintenance + Tlogistics + Tadministrative + Treturn-to-service

متوسط زمن التوقف (MDT) = زمن التشخيص + زمن الصيانة + الزمن اللوجستي + الزمن الإداري + زمن إعادة النظام إلى الخدمة

- Tdiagnosis — Diagnosis Time : زمن التشخيص
- Tmaintenance — Maintenance Time : زمن الصيانة
- Tlogistics — Logistics Time : الزمن اللوجستي
- Tadministrative — Administrative Time : الزمن الإداري
- Treturn-to-service — Return-to-Service Time : زمن إعادة النظام إلى الخدمة
- MDT — Mean Down Time : متوسط زمن التوقف
- MTBF — Mean Time Between Failures : متوسط الزمن بين الأعطال
- RAMS — Reliability, Availability, Maintainability and Safety : الموثوقية، التوافرية، قابلية الصيانة والسلامة

يُدخل الإطار المقترح قيود سلسلة الإمداد ضمن متوسط زمن التوقف (MDT). وتوفر EN 50126-1، في إصدارها الوطني المعمول به، الإطار العام لدورة حياة RAMS في السكك الحديدية [22]؛ لكنها ليست طريقة لتقييم حرجية المواد الخام. وهنا تُعامل قيود الإمداد كقيد دعم خارجي قد يضعف قابلية الصيانة والتوافر عبر إطالة الوصول إلى قطع الغيار أو قدرات الإصلاح أو الموارد اللوجستية أو تأهيل بديل، من دون أن يغير بالضرورة MTBF الجوهري. ويُستشهد بالإصدار البريطاني BS EN 50126-1:2017+A1:2024 كمرجع وثائقي، وليس كمتطلب تعاقدي عالمي.

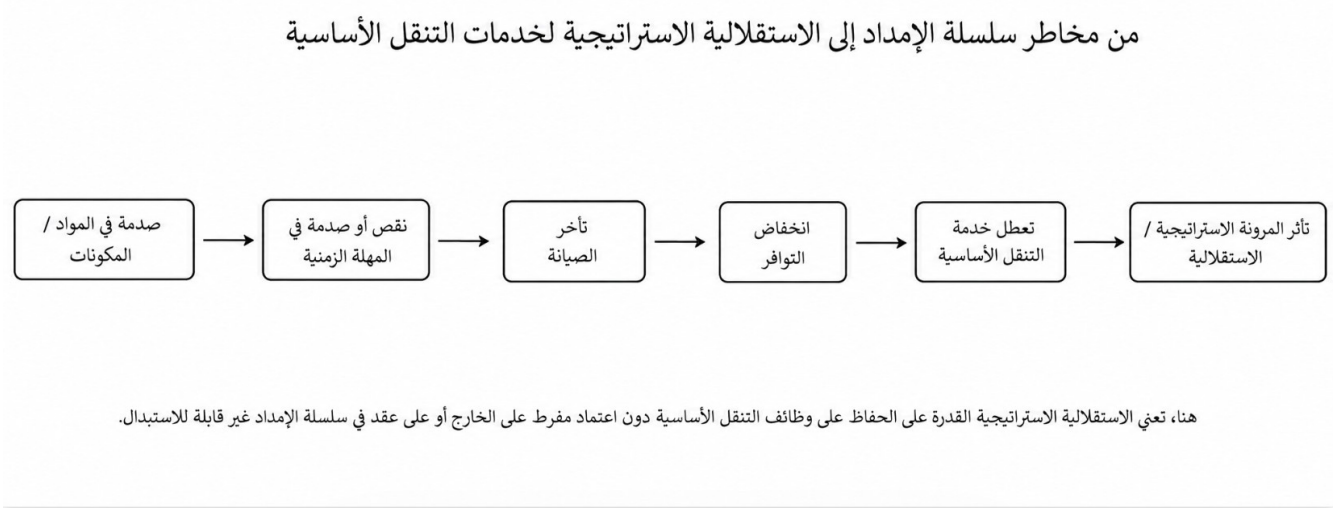
وكمثال تطبيقي في السكك الحديدية، يوضح Crossrail Learning Legacy كيف جرى دمج متطلبات RAMS ونمذجة الأداء وتسليمات الموردين الخاصة بـRAM ضمن برنامج سككي كبير؛ ويُستشهد به هنا كسياق تطبيقي لا كمنهج لتقييم حرجية المواد الخام [19].

2.5 التنقل الأساسي، والمرونة الوطنية، والسيادة التشغيلية

تتعامل التوجيهة (EU) 2022/2557 بشأن مرونة الكيانات الحرجة مع النقل باعتباره قطاعاً أساسياً، وتشمل صراحة مديري البنية التحتية للسكك الحديدية ومشغلي السكك الحديدية ومشغلي مرافق الخدمة [24]. ومن ثم لا يمكن تحليل السكك الحديدية باعتبارها سوقاً صناعياً فحسب؛ فهي تدعم في كثير من الأنظمة وظائف اجتماعية واقتصادية حيوية.

وبالتوازي، تسعى اللائحة (EU) 2024/1252 إلى ضمان وصول آمن ومرن ومستدام إلى المواد الخام الحرجة، وتربط هذه السياسة صراحة بمرونة الاتحاد الاقتصادية واستقلاليته الاستراتيجية المفتوحة [20]. ولا يثبت هذان الإطاران القانونيان أن نقص معدن ما يضر تلقائياً بسيادة الدولة؛ لكنهما يضعان مرونة الإمداد واستمرارية الخدمات الحرجة ضمن المشكلة الأوسع نفسها المتعلقة بالأمن الاقتصادي.

يقصد مصطلح «السيادة التشغيلية لمنظومات التنقل» في هذه الورقة قدرة الدولة وسلطات النقل والمشغلين على استمرار وظائف النقل الأساسية رغم الاضطرابات الخارجية، من دون اعتماد مفرط على مكوّن أو مورد أو تكنولوجيا أو قدرة إصلاح غير قابلة للاستبدال. ويعني المفهوم إدارة المخاطر والتنويع وقابلية الإصلاح والمخزون الاستراتيجي وقدرة الدعم الصناعي، وليس الاكتفاء الذاتي. وهو إطار تحليلي يعرّفه المؤلف لهذا المستند، وليس مفهوماً معيارياً أو مثبتاً تجريبياً.



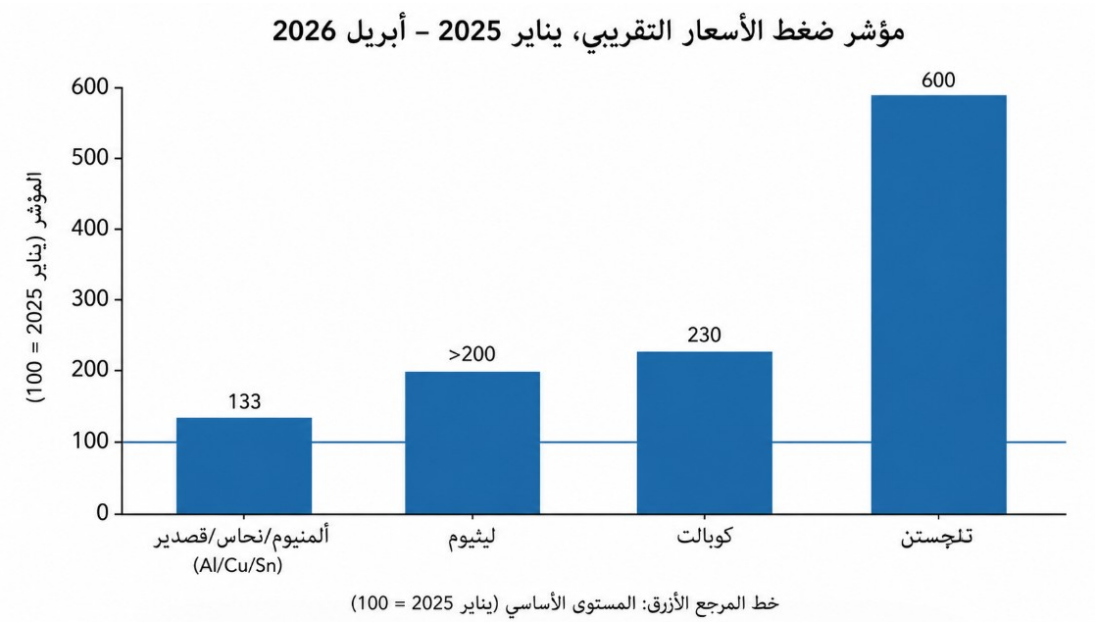
الشكل 6 - من مخاطر سلسلة الإمداد إلى الاستقلالية الاستراتيجية في خدمات التنقل الأساسية

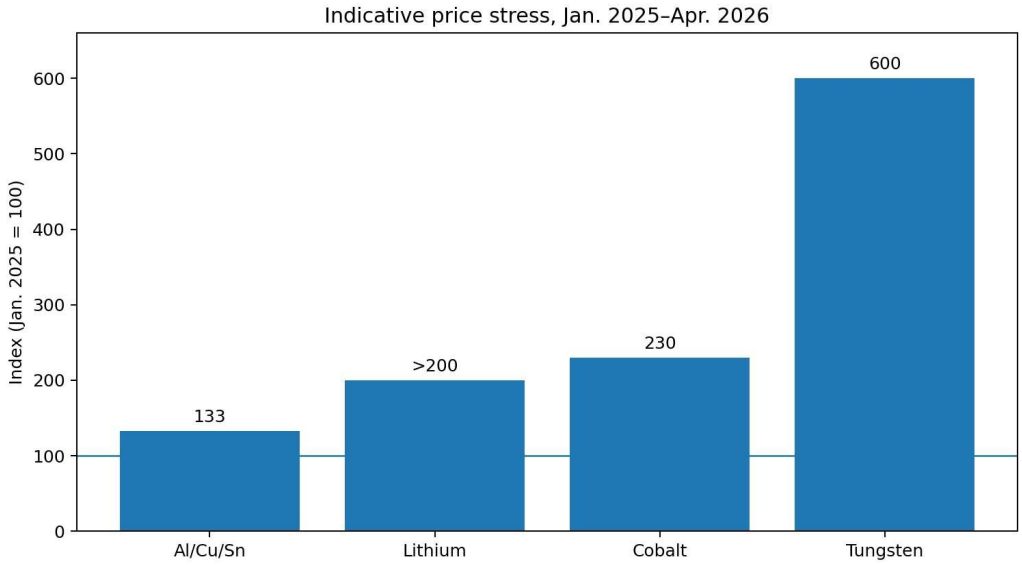
التتبّع: نموذج مفاهيمي للمؤلف يستند في صياغته إلى التوجيهة (EU) 2022/2557 [24]، واللائحة (EU) 2024/1252 [20]، ومشروع LEADER 2030 [25،26]، ومذكرة المجلس المؤرخة 5 يونيو 2026 [27]. لا توجد بيانات كمية خام.

3. سياق 2025-2026: التركّز، والأسعار، والقيود

3.1 انتعاش الأسعار

بين يناير 2025 وأبريل 2026، تفيد وكالة الطاقة الدولية بأن أسعار معادن أساسية مثل الألومنيوم والنحاس والقصدير ارتفعت بنحو الثلث. وتجاوز سعر الليثيوم الضعف، وارتفع الكوبالت بنحو 130%، وارتفع التنغستن إلى ستة أضعاف. كما كانت الأسعار الأوروبية للغاليوم وللعناصر الأرضية النادرة الثقيلة، الديسبروسيوم والتيربيوم، تقارب خمسة أضعاف الأسعار المحلية في الصين [1].





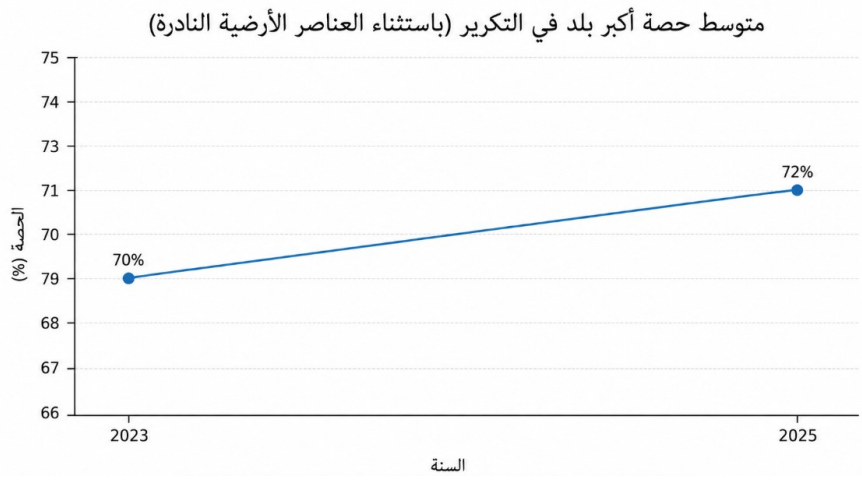
الشكل 2 - مؤشرات ضغط الأسعار الملحوظة في 2025 وبداية 2026

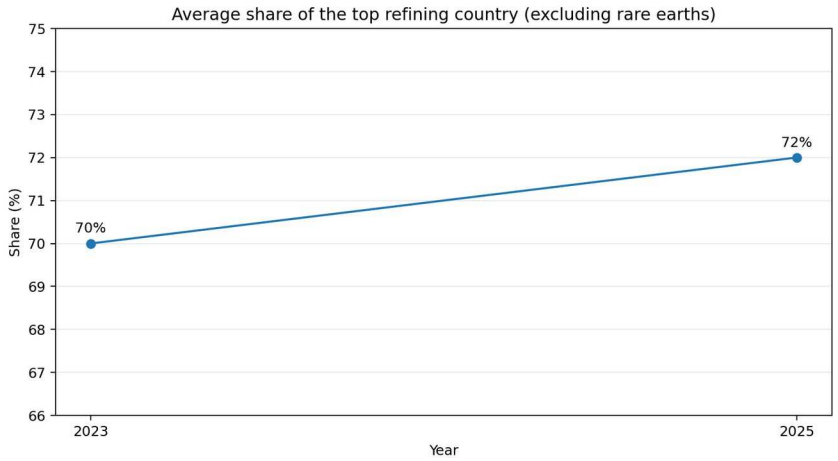
التتبّع: وكالة الطاقة الدولية، Global Critical Minerals Outlook 2026، الملخص التنفيذي، الرسم «تطورات أسعار معادن حرجة مختارة حسب الفئة، يناير 2023-أبريل 2026» [1]. التغيرات النصية المستخدمة: المعادن الأساسية نحو +33%؛ الليثيوم أكثر من الضعف؛ الكوبالت نحو +130%؛ التنغستن ×6. الطريقة: مؤشر تغير أعاد المؤلف بناءه مع يناير 2025 = 100 (133؛ ≥200؛ 230؛ 600). هذه مؤشرات/عوامل تغير وليست أسعاراً مطلقة. تاريخ الاطلاع: 25 أغسطس 2026.

3.2 تركّز التكرير

لا يقتصر التركّز على التعدين. وباستثناء العناصر الأرضية النادرة، تفيد وكالة الطاقة الدولية بأن متوسط حصة الدولة الأولى في التكرير ارتفع من 70% في 2023 إلى 72% في 2025. وفي المنغنيز والنيكل والغرافيت، جاءت تقريباً كل الزيادة الأخيرة في الإمداد المكرر من المورد المهيمن [1].

وعلى مستوى تجميعي آخر، أفاد إصدار وكالة الطاقة الدولية لعام 2025 بأن متوسط الحصة المجمعة لأكبر ثلاث دول في تكرير النحاس والليثيوم والنيكل والكوبالت والغرافيت والعناصر الأرضية النادرة ارتفع من نحو 82% في 2020 إلى 86% في 2024 [21]. ولا يجوز استخدام هذين المؤشرين بالتبادل.



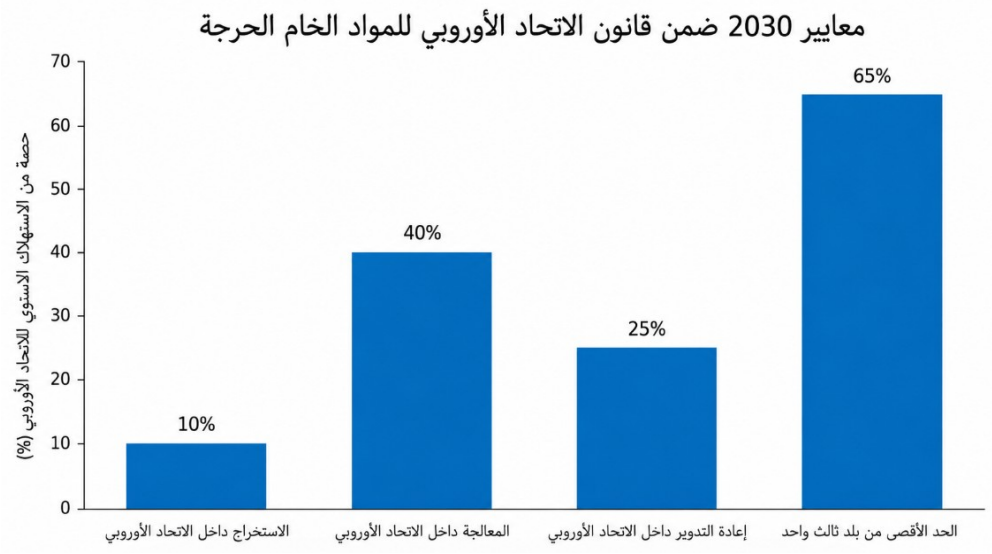


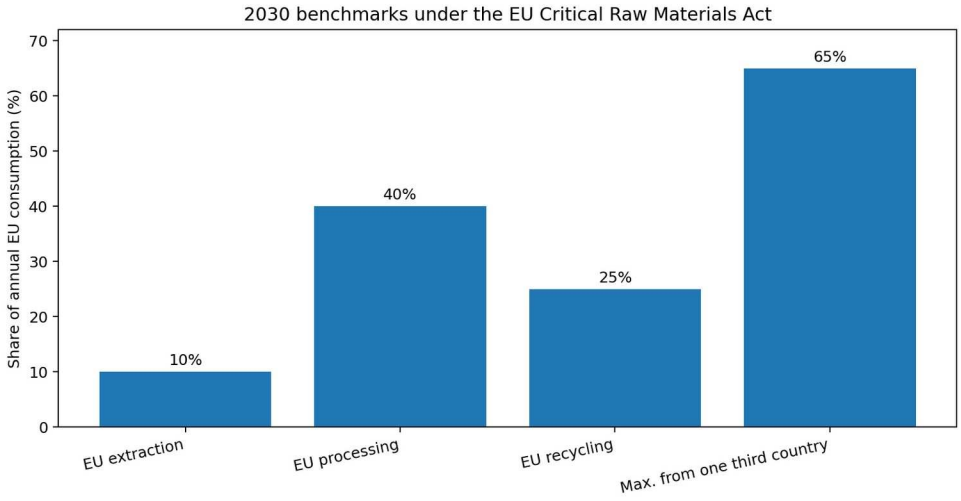
الشكل 3 - متوسط حصة الدولة الأولى في التكرير

التتبّع: وكالة الطاقة الدولية، Global Critical Minerals Outlook 2026، الملخص التنفيذي [1]. القيم الخام: متوسط حصة الدولة الأولى في التكرير باستثناء العناصر الأرضية النادرة، 70% في 2023 و72% في 2025. إعادة بناء من المؤلف؛ وهو مؤشر مختلف عن الحصة المجمعة لأكبر ثلاث دول. تاريخ الاطلاع: 25 أغسطس 2026.

3.3 الاستجابة التنظيمية الأوروبية

يحدد قانون المواد الخام الحرجة لعام 2030 مؤشرات لا تقل عن 10% من الاستهلاك السنوي للاتحاد الأوروبي من الاستخراج داخل الاتحاد، و40% من المعالجة داخل الاتحاد، و25% من إعادة التدوير، مع استهداف ألا تتجاوز درجة الاعتماد على دولة ثالثة واحدة 65% في مرحلة معالجة ذات صلة [3،20].





الشكل 4 - مؤشرات 2030 بموجب قانون المواد الخام الحرجة في الاتحاد الأوروبي

التتبّع: اللائحة (EU) 2024/1252، المادة 5 [20]. العتبات التنظيمية الخام: استخراج داخل الاتحاد 10%، معالجة داخل الاتحاد 40%، إعادة تدوير 25%، أقصى اعتماد على دولة ثالثة واحدة 65%. إعادة بناء من المؤلف. تم الاطلاع على EUR-Lex في 25 أغسطس 2026.

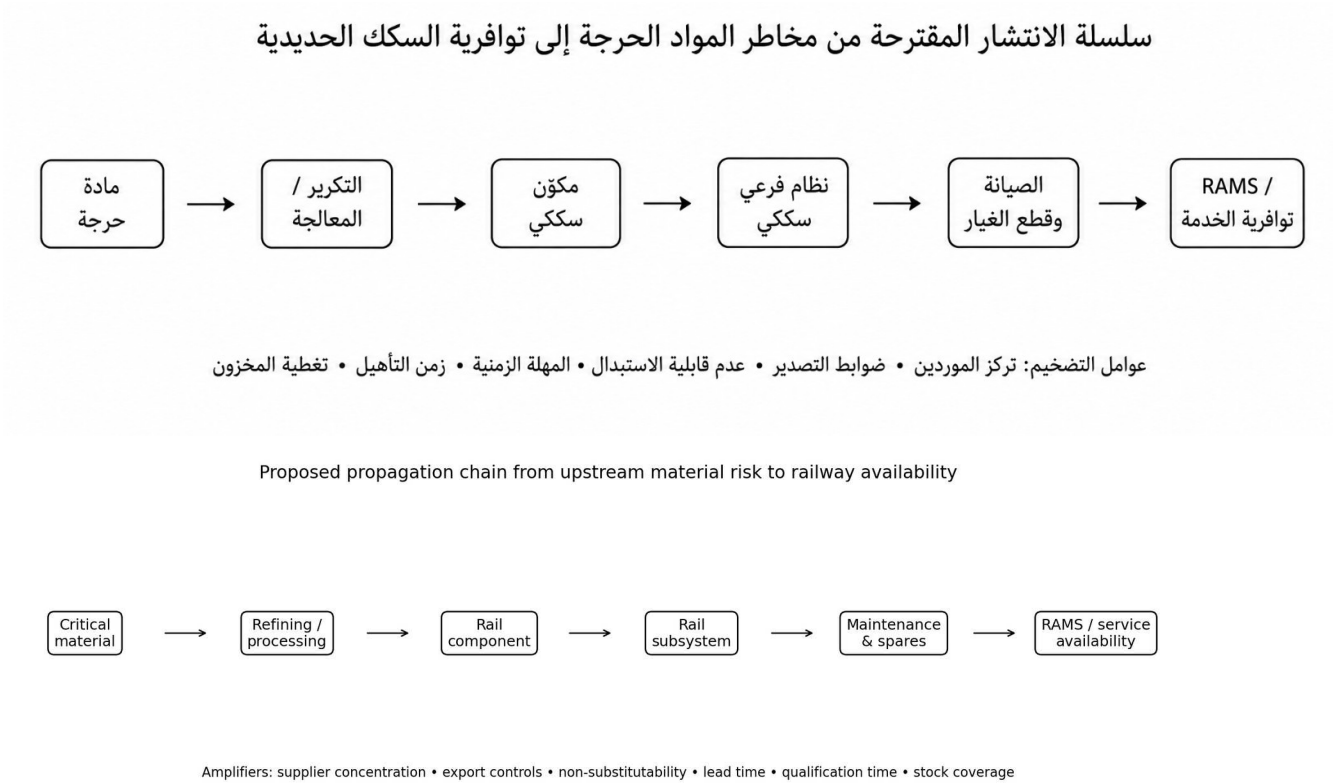
3.4 آفاق النحاس

يكتسب النحاس أهمية خاصة في طاقة الجر والأنظمة الكهربائية للسكك الحديدية. وفي الحالة المركزية، ما زالت وكالة الطاقة الدولية تتوقع فجوة تقارب 25% في 2035 بين الإمداد المتوقع من المشروعات المعلنة ومتطلبات الإمداد الأولي [1]. وهذا لا يعني تلقائياً حدوث نقص في السكك الحديدية؛ لكنه يشير إلى ضغط هيكلي ذي صلة بالاستثمارات والإصلاحات الثقيلة والمحولات والكابلات والآلات الكهربائية.

4. من المادة إلى خدمة السكك الحديدية: النموذج السببي

يجب تجنب اختصارين: (1) استنتاج خطر على السكك الحديدية من حرجية معدن وحدها؛ و(2) استنتاج نقص في قطع الغيار من ارتفاع الأسعار.

ويجب إثبات سلسلة الانتقال كاملة.



الشكل 5 - سلسلة الانتقال المقترحة من المخاطر الأولية إلى توافر السكك الحديدية

التتبّع: نموذج مفاهيمي للمؤلف. لا توجد بيانات كمية خام؛ وهو مخطط منهجي وليس نتيجة تجريبية.

4.1 مستويات التحليل

L0 - المادة: الاستخراج والتوافر الأولي.

L1 - التكرير / المعالجة: التنقية، والمعادن، والمواد المتقدمة.

L2 - المكوّن: مغناطيس، شريحة كربون، خلية بطارية، وحدة SiC، موصل، ملف، إلخ.

L3 - النظام الفرعي: بانتوغراف، محرك، محول إلكتروني، محول كهربائي، بطارية، إشارات، إلخ.

L4 - الصيانة: المخزون، الإصلاح، الاستبدال، إعادة التأهيل، والتقادم.

L5 - الخدمة: عدم توافر قطار أو منشأة أو سعة نقل.

L6 - المرونة الاستراتيجية: عندما تكون الخدمة أساسية، تقييم الآثار على استمرارية التنقل والوظائف الاقتصادية المرتبطة به والاستقلالية التشغيلية في ظل الاعتماد الخارجي.

4.2 مقياس الأدلة

المستوى	التعريف	الاستخدام في هذه الدراسة
E3 - مباشر	مصدر أولي في السكك الحديدية أو منشور علمي يثبت الاستخدام صراحة.	يدعم استنتاجاً قوياً بشأن الوجود/الاستخدام.
E2 - قوي	التكنولوجيا راسخة في السكك الحديدية، لكن التركيب الدقيق يعتمد على المنتج.	استنتاج على مستوى عائلة التكنولوجيا مع الحذر بشأن المادة الدقيقة.
E1 - يحتاج إلى تحقق	صلة محتملة عبر الإلكترونيات أو السبيكة أو قائمة مواد عامة.	لا يُستنتج شيء من دون BOM أو ورقة بيانات مادة.
E0 - غير مثبت	أدلة غير كافية ضمن نطاق المراجعة.	يُستبعد من الاستنتاجات ويُحتفظ به كسؤال بحثي.

5. رسم خريطة عائلات المواد والمكونات

يفصل الفرز الأولي بين المواد التي لها صلة موثقة مباشرة بالسكك الحديدية وتلك التي لا يمكن تأكيدها إلا من خلال قوائم مواد خاصة بالمنتج. ويمنع ذلك افتراض وجود كل مادة خام حرجة في الاتحاد الأوروبي «داخل القطار» بصورة تلقائية.

المادة / العائلة	الصلة السككية المحتملة	الدليل	التحفظ المنهجي
الكربون / درجات الكربون	شرائح البانتوغراف؛ أحذية السكة الثالثة	E3	يجب تحديد التركيبة الدقيقة ومصدر الغرافيت الطبيعي/الصناعي لكل درجة.
النحاس	شرائح مشربة، كابلات، ملفات، محولات، موصلات	E3	تعرض للسعر/الحجم؛ والاستبدال الجزئي يعتمد على البنية.
الألومنيوم	حوامل، هياكل، موصلات/محولات بحسب	E3/E2	يمكن أن يحل محل النحاس في تطبيقات

	التصميم		موثقة، وفقاً للهندسة.
Nd / Pr / Dy / Tb	مغناطيسات دائمة في بعض محركات الجر	E3	سلسلة التكرير وتصنيع المغناطيسات شديدة التركّز.
الليثيوم	خلايا Li-ion في القطارات العاملة بالبطارية/الهجينة	E3	تعتمد الحرجية على كيمياء الخلية واستراتيجية استبدال الحزمة.
النيكل / الكوبالت / المنغنيز	بعض كيميائيات Li-ion	E2	لا يجوز التعميم من دون معرفة كيمياء الخلية.
الغرافيت الطبيعي / الصناعي	أنودات البطاريات؛ مواد كربونية حسب العملية	E2/E1	يجب إثبات المادة الأولية للكربون في البانتوغراف.
السيليكون / SiC	وحدات القدرة ومحولات الجر	E3 بالنسبة إلى SiC	قد يقع الاختناق عند مستوى الرقاقة/الوحدة/التغليف لا عند المعدن نفسه.
Ga / Ge / In / Ta / Sn	إلكترونيات متقدمة حسب BOM	E1	تتطلب BOM ودليلاً من المصنع.
W / V / Nb / Ti	سبائك ومكونات متخصصة بحسب الدرجة	E1	يجب التحقق من درجة المادة ومواصفة المورد.
معادن مجموعة البلاتين PGM	تطبيقات متخصصة محتملة	E0/E1	لا يوجد ادعاء عام بوجودها في السكك الحديدية في هذه النسخة.

6. دراسات حالة في السكك الحديدية

6.1 الحالة أ - شريحة تماس البانتوغراف

توثق Mersen شرائح تماس للسكك الحديدية مصنوعة من مواد كربونية، بما في ذلك درجات كربون خالصة وأخرى مشربة بالنحاس، مع حوامل قد تكون من الألومنيوم أو النحاس أو الفولاذ، وتحسينات في تشريب النحاس لتطبيقات

التيار العالي [7]. كما تؤكد أبحاث احتكاكية حديثة أن تآكل شرائح الكربون موضوع يرتبط مباشرة بالتشغيل والصيانة في السكك الحديدية [11].

تصحيح اختصار شائع
سيكون من غير الصحيح علمياً كتابة «نقص الغرافيت الطبيعي = نقص شرائح البانتوغراف». يجب إثبات السلسلة: درجة الكربون ← المادة الأولية ← عملية التصنيع ← المورد ← تأهيل الشبكة. ولا تكفي كلمة «كربون» وحدها لإثبات استخدام الغرافيت الطبيعي أو الصناعي.

منظور التشغيل والصيانة: الشريحة مادة استهلاكية لا غنى عنها. وتعتمد قابليتها للتأثر على الاستهلاك المرتبط بالمسافة، ومخزون الأمان، وعدد الدرجات المعتمدة، وزمن تأهيل مورد جديد، وإمكان تطبيق تدابير تشغيلية مؤقتة للتخفيف.

قراءة مادية لحالة البانتوغراف - تجنب المعادلة التلقائية «الكربون = الغرافيت الطبيعي».

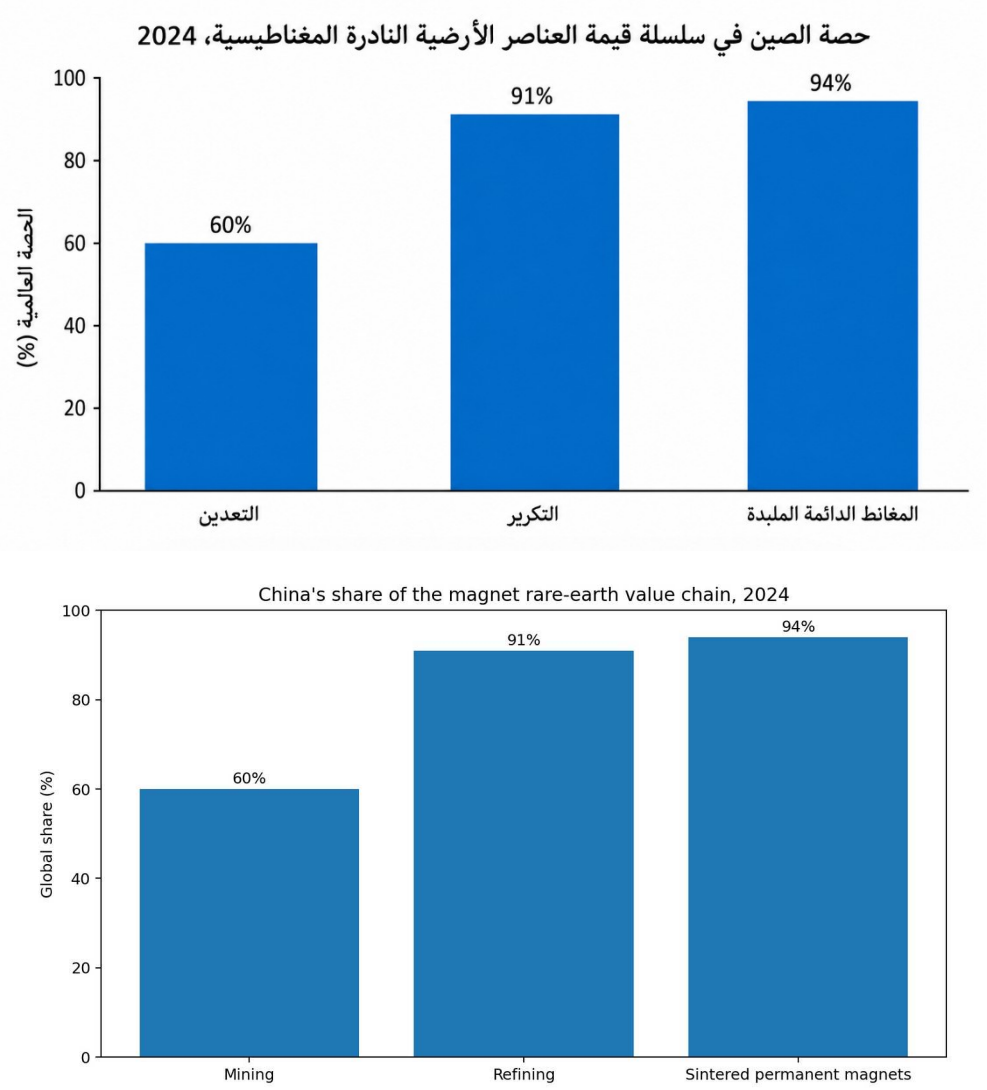
المستوى	مثال / تفسير	الدليل المطلوب
المنتج النهائي	شريحة تماس البانتوغراف	مرجع المنتج / اعتماد الشبكة
عائلة المادة	كربون؛ كربون-نحاس بحسب الدرجة	ورقة البيانات التقنية للمصنع
مكونات محتملة	غرافيت طبيعي أو صناعي، فحم كوك، مادة رابطة/راتنج، نحاس، بحسب التركيبة	ورقة بيانات المادة أو التركيبة أو شهادة المورد
الاستنتاج المسموح	يعتمد على الدرجة المعتمدة بدقة	لا يجوز استنتاج الاعتماد على الغرافيت الطبيعي من كلمة «كربون» وحدها

تعتمد المرونة أيضاً على عمق الدعم الصناعي. وتذكر Mersen أنها تستطيع اقتراح قطع الغيار اللازمة للصيانة الوقائية والتصحيحية لأكثر من 15 عاماً [23]. وهذه مدة دعم من المورد، وليست ضماناً عاماً لبقاء كل مادة أولية أو درجة كربون متاحة.

6.2 الحالة ب - العناصر الأرضية النادرة ومحركات الجر

تقدر وكالة الطاقة الدولية أن الصين استحوذت في 2024 على نحو 60% من استخراج العناصر الأرضية النادرة المستخدمة للمغناطيسات، و91% من التكرير، و94% من إنتاج المغناطيسات الدائمة الملبدة [2]. وقد أدت قيود التصدير التي فُرضت في أبريل 2025 إلى صعوبات إمداد في صناعات لاحقة في السلسلة [2].

تعتمد مغناطيسات NdFeB عالية الأداء أساساً على النيوديميوم والبراسيوديميوم، وقد تستخدم الديسبروسيوم والتيربيوم لتحسين القوة القسرية والأداء عند درجات الحرارة المرتفعة [2]. ولذلك يمكن أن يؤثر تقييد عنصر أرضي نادر ثقيل في توافر المغناطيس حتى إذا ظل النيوديميوم متاحاً.



الشكل 7 - تركّز سلسلة القيمة للعناصر الأرضية النادرة المستخدمة للمغناطيسات في 2024

التتبّع: وكالة الطاقة الدولية، Rare Earth Elements، الملخص التنفيذي، 2026 [2]. القيم الخام المستخدمة: الصين نحو 60% من تعدين العناصر الأرضية النادرة للمغناطيسات، و91% من التكرير، و94% من إنتاج المغناطيسات الدائمة الملبدة في 2024. إعادة بناء من المؤلف. تاريخ الاطلاع: 25 أغسطس 2026.

تؤكد Alstom مباشرة الصلة بالسكك الحديدية، إذ تشير إلى استخدام مغناطيسات العناصر الأرضية النادرة في بعض محركات الجر وإلى دراستها تقنيات تحد من استخدام المغناطيسات الدائمة [6]. كما توفر مراجعة منشورة في 2022 لطوبولوجيات محركات الجر السككية سياقاً تقنياً أوسع لمحركات المغناطيس الدائم ومحركات الممانعة في الجر الموزع [12]. وتقدم Mitsubishi Electric بنية بديلة ذات صلة: يستخدم SynTRACS محركاً تزامنياً بالممانعة لا يحتوي دواره على مغناطيسات دائمة ولا على عناصر أرضية نادرة؛ وبدأ الإنتاج التجاري خلال السنة المالية المنتهية في مارس 2025 [9].

يوضح ذلك أن المرونة يمكن تحسينها على مستوى بنية المنتج. أما في أسطول قائم، فلا يستطيع المشغل استبدال تقنية محرك أو دوار من دون إعادة تصميم والتحقق على مستوى النظام وربما ترخيص أو اعتماد جديد.

6.3 الحالة ج - النحاس والمحولات وطاقة الجر

تربط Alstom صراحة ارتفاع أسعار النحاس بمكونات سككية مثل المحولات، وتذكر تصاميم لمحولات يمكنها استخدام الألومنيوم بدلاً من النحاس [6]. وهذا دليل مباشر على أن ظروف إمداد المواد تؤثر بالفعل في الخيارات الهندسية للسكك الحديدية.

بالنسبة إلى المشغل، يظل الاستبدال بعد دخول الخدمة خاضعاً للتوافق الكهربائي والحراري والميكانيكي والوثائقي. ولذلك لا يكمن خطر التشغيل والصيانة في سعر النحاس الفوري فقط، بل أيضاً في القدرة على إصلاح الملفات، وتوريد الكابلات، ودعم الأصول الكهربائية الثقيلة ذات الدورة الصناعية الطويلة.

6.4 الحالة د - بطاريات الليثيوم-أيون

توثق Hitachi Rail خلايا ليثيوم-أيون معيارية في القطارات العاملة بالبطاريات والقطارات الهجينة [8]. ويتوقف التعرض للمواد على كيمياء الخلية؛ فلا تستخدم جميع بطاريات الليثيوم-أيون الكميات نفسها من النيكل أو الكوبالت أو المنغنيز. ولذلك يجب أن يصل التحليل إلى مستوى كيمياء الخلية ومصنعها وبنية الحزمة.

يشمل التعرض في التشغيل والصيانة توافر الخلايا المتوافقة، وقيود نظام إدارة البطارية BMS، والتقادم الزمني، واستبدال الحزمة، وقواعد النقل والتخزين، وقابلية الإصلاح، وإعادة التدوير، والدعم طويل الأجل عبر أجيال متعددة من تكنولوجيا البطاريات.

6.5 الحالة هـ - SiC وإلكترونيات القدرة

توثق Europe's Rail عروضاً تجريبية لأنظمة جر تستخدم وحدات قدرة من كربيد السيليكون SiC بجهد 3.3 kV وتيار 800 A، إضافة إلى محولات جر تعتمد SiC [10]. كما تصف الأدبيات العلمية محولات جر كاملة من SiC لتطبيقات السكك الحديدية الخفيفة [13].

توضح هذه الحالة لماذا لا تكفي «المادة الخام» كوحدة تحليل. فقد يقع الاختناق في المادة عالية النقاوة، أو الرقاقة، أو عملية تصنيع أشباه الموصلات، أو التغليف عالي القدرة، أو مصنع الوحدة، أو التأهيل السككي. لذلك يجب أن تشمل الدراسة المكونات الحرجة إلى جانب المواد الخام.

7. مؤشر قابلية تأثر المواد والمكونات في السكك الحديدية (RMCVI) المقترح

يُقترح **RMCVI** كإطار استكشافي للفرز الأولي بهدف ترتيب أوجه قابلية التأثر في الصيانة. وهو ليس معياراً أو طريقة اعتماد أو مؤشراً تنبؤياً مُثبتاً. وتعتمد قيمته العلمية على التحقق التجريبي، وشفافية الأوزان، والمعايرة على حالات صناعية.

في هذه النسخة، تُدمج آثار السلامة والتوافر وسعة النقل والآثار التنظيمية/الاعتمادية ضمن D - الاعتماد الوظيفي، للحفاظ على بساطة النموذج وتقليل الازدواج في العد.

البعد	التعريف التشغيلي
U - مخاطر الإمداد الأولية	تركّز التعدين/التكرير، قيود التصدير، توازن العرض والطلب، الحوكمة، والتعرض الإقليمي.
D - الاعتماد الوظيفي	مدى عدم الاستغناء عن المكوّن في الوظيفة السككية؛ وآثاره على التوافر والسلامة وسعة النقل ونمط التشغيل المتدهور واستمرارية الخدمة الأساسية والقيود التنظيمية/الاعتمادية.

NS - مخاطر عدم القابلية للاستبدال	الخطر الناتج عن غياب مادة أو مورد أو تكنولوجيا بديلة أو عدم نضجها أو عدم تأهيلها.
Q - صرامة التأهيل	الزمن والاختبارات والترخيص وإثبات السلامة والتوافق والوثائق المطلوبة قبل الاستبدال.
L - التعرض اللوجستي	مهلة التوريد، المصدر الوحيد، عمق سلسلة الإمداد، قدرة الإصلاح، والمخزون المتاح.

RMCVI = 100 × (wU·U + wD·D + wNS·NS + wQ·Q + wL·L), with Σwi = 1

تُقيّم U وD وNS وQ وL أولاً على مقياس رتبي من 0 إلى 3، ثم تُطبّع وفق

X_normalised = X_score / 3

قبل تطبيق الأوزان. ولا ينبغي اختيار الأوزان على أساس الملاءمة فقط؛ إذ يمكن لمنهج Delphi تثبيت المعايير، ويمكن لـAHP تنظيم المقارنات الثنائية واختبارات الاتساق [16،17]. ولا يُفترض أن الأبعاد مستقلة إحصائياً؛ وينبغي للتحقق اختبار الارتباطات واحتمال الازدواج في العد، ولا سيما بين D وNS وQ. ولا يُدعى وجود عتبة عالمية لـ«قابلية التأثر العالية» في هذه المرحلة. وبما أن التقديرات من 0 إلى 3 فئات رتبية للفرز الأولي، فإن تجميعها الموزون يُعد أداة إرشادية عملية وليس قياساً على مقياس فاصل. وينبغي استخدام المؤشر للمقارنة والفرز وتحليل الحساسية، لا تفسيره على أنه كمية مقاسة فيزيائياً أو مسافة عددية دقيقة بين المكونات.

يجب تفسير الدرجة المجمعة إلى جانب مخرج منفصل بعنوان «الأثر التشغيلي»، يغطي السلامة والتوافر وسعة النقل والآثار التنظيمية/الاعتمادية والطابع الأساسي للوظيفة. ولذلك قد تكون سلسلة شديدة القابلية للتأثر ذات أثر تشغيلي محدود، بينما قد يؤثر مستوى متوسط من القابلية للتأثر في وظيفة ذات عواقب شديدة جداً.

7.1 شبكة درجات توضيحية تحتاج إلى التحقق

الدرجة	U - الإمداد الأولي	D - الاعتماد الوظيفي	NS - عدم القابلية للاستبدال	Q - التأهيل	L - اللوجستيات
0	مصادر متنوعة؛ لا قيود مادية	وظيفة غير حرجة؛ أثر ضئيل على السلامة/التوافر/الخدمة الأساسية	بديل مؤهل وفوري	لا حاجة لإعادة التأهيل	مصادر متعددة؛ مخزون مرتفع

1	تركّز متوسط	أثر محدود؛ نمط متدهور متين؛ استمرارية الخدمة محفوظة	بديل مؤهل متاح	تحقق وثائقي قصير	مهلة توريد منخفضة
2	تركّز مرتفع	أثر مهم على التوافر/السعة أو الاعتماد أو الخدمة الأساسية؛ نمط متدهور محدود	بديل معروف لكنه غير مؤهل بعد	اختبارات/تحقق مهم	مهلة متوسطة / مصدر وحيد جزئياً
3	تركّز شديد جداً / قيود	وظيفة لا غنى عنها؛ مسألة سلامة أو توقف كبير أو انقطاع خدمة أساسية؛ لا نمط متدهور مقبول	لا بديل ناضج أو قابل للتأهيل سريعاً	إعادة تصميم أو ترخيص ثقيل	مصدر وحيد؛ تغطية مخزون منخفضة
مهم					
هذا المقياس بروتوكول مقترح وليس نتيجة. وتحتاج العتبات إلى المعايرة على حالات حقيقية وتحليل الحساسية.					

7.2 مثال حسابي - للتوضيح فقط

لإظهار الحساب من دون عرض درجات صناعية غير مدعومة، لنفترض مكوّناً افتراضياً بدرجات مؤقتة U=3 وD=3 وNS=2 وQ=2 وL=3، وبأوزان متساوية w=0.20، استُخدمت هنا لأغراض تعليمية فقط ومن دون استباق الأوزان المستقبلية الناتجة عن Delphi/AHP. بعد التطبيع تصبح القيم 1.00 و1.00 و0.67 و0.67 و1.00؛ وتكون نتيجة RMCVI هي 86.7/100. وهذا حساب تعليمي فقط؛ فلا يُسند إلى شريحة بانتوغراف أو مغناطيس جر أو وحدة SiC، ولا يمثل نتيجة تجريبية.

بالنسبة إلى عائلات دراسات الحالة الثلاث أدناه، تكفي الأدلة الوثائقية الحالية لتعريف سلسلة المكوّن-المادة، لكنها لا تكفي لنشر درجة RMCVI يمكن الدفاع عنها. لذلك تُذكر البيانات الصناعية المفقودة صراحةً بدلاً من اختلاقها.

عائلة دراسة الحالة	ما تم توثيقه في هذه الورقة	ما ينقص قبل نشر درجة **RMCVI**

		يمكن الدفاع عنها
شريحة تماس البانتوغراف	درجات كربون/نحاس؛ أهمية التآكل؛ بيان دعم طويل الأجل من المورد	الدرجة/التركيبة المعتمدة؛ عدد المصادر المؤهلة؛ المخزون؛ مهلة التوريد؛ مدة التأهيل؛ خيارات الإصلاح/الاستبدال
محرك جر بمغناطيس دائم	استخدام مغناطيسات أرضية نادرة في بعض محركات الجر؛ التركّز الأولي؛ وجود بنية محرك بديلة	التركيب الدقيق للمغناطيس؛ سياسة قطع غيار المحرك/الدوار؛ هيكل الموردين؛ المخزون؛ مهلة التوريد؛ مدة إعادة التصميم وإعادة الترخيص
محول جر SiC	استخدام سككي لوحدات SiC بجهد 3.3 kV / 800 A وتقنية محولات كاملة من SiC	مرجع الوحدة/BOM؛ الموردون المؤهلون؛ قابلية الإصلاح؛ المخزون؛ مهلة التوريد؛ قيود الاستبدال والتأهيل

7.3 من RMCVI إلى العاقبة الاستراتيجية

يبقى **RMCVI** عمداً مؤشراً لقابلية التأثر في التشغيل والصيانة؛ فهو لا يقيس سيادة الدولة. وبعد حساب الدرجة، ينبغي لتقييم نوعي ثانٍ أن يحدد ما إذا كان المكوّن يدعم وظيفة تنقل أساسية، وما إذا كانت الاحتياطيات وأنماط التشغيل المتدهورة قادرة على امتصاص الصدمة، وما إذا كان الإصلاح أو الاستبدال أو التوريد يمكن تعبئته ضمن زمن يتوافق مع استمرارية الخدمة.

يمنع هذا الفصل المبالغة في الاستنتاج: فقد لا تكون لمادة شديدة القابلية للتأثر أي عاقبة استراتيجية على شبكة معينة، بينما قد يصبح مكوّن منخفض التكلفة يُستخدم بكميات ضئيلة مهماً استراتيجياً إذا أدى غيابه إلى تعطيل وظيفة سككية حرجة مدة أطول من هوامش المرونة المتاحة.

8. البعد الزمني: تغطية المخزون مقابل زمن الاستعادة

لا تصبح الشبكة بالضرورة غير متاحة في اليوم الذي يتعطل فيه منجم أو مصفاة أو جهة تصدير. فبين الصدمة الأولية والأثر التشغيلي توجد مخزونات المواد، والمكونات الجاهزة، ومخزون المصنع الأصلي، ومخزون المشغل، وخيارات الإصلاح، واستراتيجيات الاستبدال. ولذلك يجب نمذجة الزمن صراحةً.

مبدأ زمن التأثير: تغطية المخزون مقابل زمن الاستعادة

1. المعادلة الأولى (تغطية المخزون):

تغطية المخزون (بالأشهر) = المخزون الصالح للاستخدام / متوسط الاستهلاك الشهري

Stock coverage (months) = usable stock / average monthly consumption

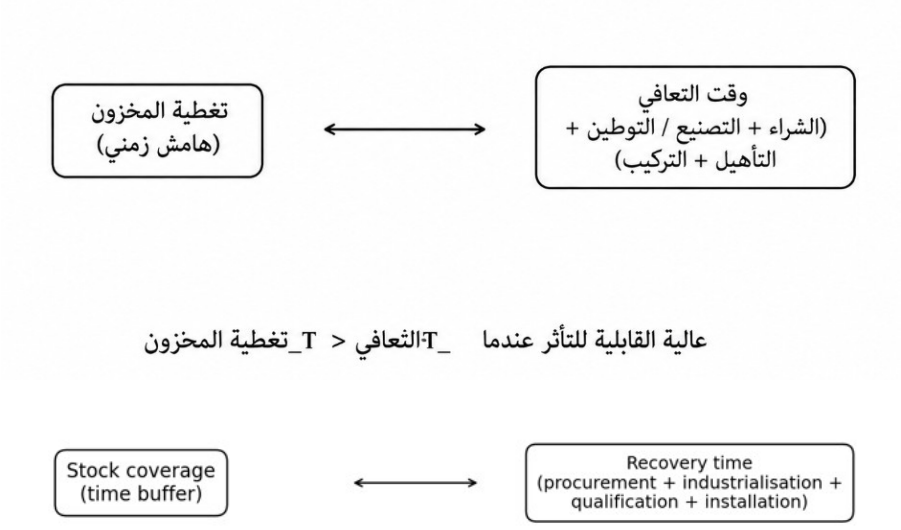
2. المعادلة الثانية (زمن الاستعادة):

زمن الاستعادة = زمن المشتريات + زمن التهيئة الصناعية + زمن التأهيل + زمن التركيب

T_recovery = T_procurement + T_industrialisation + T_qualification + T_installation

3. الشرط (حالة قابلية التأثر العالية / الخطورة العالية):

حالة قابلية التأثر العالية: زمن الاستعادة > زمن تغطية المخزون



High-vulnerability condition: T_recovery > T_stock_coverage

توضيح المصطلحات بالإنجليزية والعربية:

Stock coverage (months) تغطية المخزون (بالأشهر)

Usable stock المخزون الصالح للاستخدام

Average monthly consumptionمتوسط الاستهلاك الشهري

T_recovery (Time of recovery) زمن الاستعادة

T_procurement زمن المشتريات / التوريد

T_industrialisation زمن التهيئة الصناعية / التصنيع

T_qualification زمن التأهيل / الاعتماد

T_installation زمن التركيب / التثبيت

High-vulnerability condition حالة قابلية التأثر العالية

T_stock_coverage زمن تغطية المخزون

الشكل 8 - مبدأ مقارنة تغطية المخزون بزمن الاستعادة

التتبّع: مخطط مفاهيمي للمؤلف. لا توجد قيم مرصودة. الشرط T_recovery > T_stock coverage هو شرط فرز للمواد ذات الاستخدام المنتظم، ولا يحل محل النمذجة الاحتمالية لقطع الغيار الحرجة بطيئة الحركة أو القابلة للإصلاح.

بالنسبة إلى القطع بطيئة الحركة جداً، لا يكفي متوسط الاستهلاك. لذلك يميز الإطار بين نظامين: (1) عناصر تُستهلك بانتظام وتكون تغطية المخزون ذات معنى بالنسبة إليها؛ و(2) قطع غيار تأمينية، وقطع حرجة قابلة للإصلاح، وعناصر بطيئة الحركة، حيث ينبغي للتحليل أن يدمج احتمال العطل، وعدد المعدات المعرضة، وعدد القطع الاحتياطية المتاحة، ومعدل الإصلاح، ودورة عودة الإصلاح، وإمكان التفكيك لاستخدام القطع، والعمر المتبقي للأسطول، والحد الأقصى المقبول لزمن التوقف.

9. RAMS والتوافر وتكلفة دورة الحياة

9.1 التوافر

يؤثر ضغط الإمداد أساساً في أزمنة استعادة الخدمة واحتمال نفاد المخزون. وفي نظام ذي احتياطية، قد يظل الأثر خفياً حتى فقدان أصل ثانٍ؛ أما في الأنظمة غير الاحتياطية أو المكونات المشتركة على مستوى الأسطول، فقد ينتقل الأثر إلى وحدات متعددة.

A ≈ MTBF / (MTBF + MDT)

توضح هذه الصيغة المبسطة الآلية: يمكن لزيادة كبيرة في **MDT** مدفوعة باللوجستيات أن تخفض التوافر من دون أي تغيير في **MTBF** الجوهري. وينبغي للنموذج الواقعي أن يمثل أيضاً الاحتياطية، وتفكيك الأصول لاستخدام قطعها، ودورات الإصلاح، وتكوين الأسطول، وقيود التشغيل.

9.2 تكلفة دورة الحياة والتقلب

تتعرض تكلفة دورة الحياة لزيادات أسعار المواد، وعلاوات تأمين الإمداد، والمخزون الاستراتيجي، وتأهيل مصادر بديلة، وإعادة التصميم، والتقادم، وتكلفة عدم التوافر. وقد تقلل بعض البدائل الوزن أو التكلفة؛ ويبين مثال **Alstom** لمحولات النحاس/الألومنيوم هذا الاحتمال [6].

9.3 الدائرية والإصلاح

يقلل إعادة التدوير والتجديد الاعتماد على المواد الأولية، لكنه لا يلغي قيود التأهيل. وتحدد وكالة الطاقة الدولية إعادة التدوير كمساهمة متزايدة الأهمية في أمن المعادن مستقبلاً [18]. وفي السكك الحديدية، قد يشكل إطالة عمر المكوّن من خلال إصلاح اللوحات، وإعادة لف الملفات، والتجديد، واسترداد القطع، وعمليات الشراء النهائية المنظمة قبل إيقاف الإنتاج خط دفاع عملي أول للمرونة.

10. المنهج الوثائقي وبروتوكول التحقق المقترح

تستخدم هذه الورقة مراجعة وثائقية استكشافية تجمع بين مصادر مؤسسية ومعيارية وصناعية وأكاديمية. وقد اختيرت المصادر بناءً على صلتها بالسكك الحديدية، وقابليتها للتتبع، وتفضيل الأدلة الأولية/المؤسسية، وقدرتها على ربط مادة بمكوّن أو بخطر صيانة. وهذه ليست بعد مراجعة منهجية وفق PRISMA.

المرحلة	الطريقة	البيانات	المخرج
P1	مراجعة منهجية - تعزيز مستقبلي	Scopus، WoS، IEEE، + ScienceDirect، Springer مصادر مؤسسية	متن المصادر وشبكة PRISMA معدلة
P2	تفكيك وظيفي	بنية القطار/البنية التحتية؛ وظائف طاقة الجر والجر والإشارات	تصنيف الأنظمة الفرعية
P3	BOM / أوراق بيانات المواد	قوائم OEM، الشهادات، البيانات التقنية	رسم مكوّن → مادة
P4	رسم خريطة سلسلة الإمداد	بلدان التعدين/التكرير، الموردون، مهل التوريد، القيود	خريطة الاعتماديات
P5	Delphi + AHP	المشغلون، مسؤولو الصيانة، المصنعون، خبراء سلسلة الإمداد	أوزان وعتبات RMCVI
P6	التحقق	المخزونات، الأعطال، الاستهلاك، سيناريوهات الاضطراب	اختبار خلفي وتحليل حساسية

10.1 لجنة الخبراء المستهدفة

يمكن للجنة أولية تضم نحو 20 إلى 40 خبيراً أن تشكل نقطة انطلاق عملية لمرحلة Delphi أولى، بشرط بلوغ تشبع الاستجابات، وتمثيل فئات أصحاب المصلحة بشكل كاف، واستقرار النتائج. ولا يُعرض هذا النطاق باعتباره حجماً عالمياً

أو إلزامياً للجنة. وينبغي أن تغطي اللجنة صيانة المعدات المتحركة والبنية التحتية، وطاقة الجر، وسلسلة الإمداد، وقطع الغيار، وRAMS، والمكونات، ودعم المصنعين، وإدارة التقادم، مع تنوع جغرافي كاف للحد من التحيز.

تعتمد الطريقة Delphi على 3 خطوات رئيسية:

استبيانات سرية: يُجيب الخبراء على الأسئلة بشكل فردي دون أن يعرفوا آراء بعضهم، لتجنب التأثير المتبادل.

تجميع النتائج: يقوم المنظم بجمع الإجابات، وإعداد ملخص لها، ثم إرساله مجدداً إلى الخبراء.

مراجعة وتعديل: يقرأ الخبراء ملخص آراء زملائهم ويعدلون إجاباتهم إذا لزم الأمر. تتكرر العملية حتى نصل إلى نتائج مستقرة ومجمع عليها.

10.2 الحد الأدنى من البيانات الصناعية

- مرجع المكوّن ووظيفته
- الكمية المركبة لكل قطار/منشأة
- المخزون القابل للاستخدام والمخزون المعزول
- الاستهلاك السنوي وسجل الأعطال
- مهلة التوريد الاسمية والقصوى والمرصودة
- عدد الموردين المؤهلين
- متوسط زمن الإصلاح
- توافر البديل وحالة تأهيله
- المدة التعاقدية للتوافر/الدعم
- حالات التقادم وعمليات الشراء النهائية قبل إيقاف الإنتاج
- الأثر التشغيلي لنفاد المخزون

11. سيناريوهات الضغط المقترحة والبروتوكول التجريبي

تمثل سيناريوهات S0-S6 شروط اختبار مقترحة، وليست نتائج مرصودة في شبكة سكك حديدية عاملة. وهي مخصصة لتحليل حساسية لاحق عندما تتوافر بيانات المكونات والمخزون والأعطال ومهل التوريد.

السيناريو	الصدمة	المتغير الرئيسي	المخرجات
S0 - خط الأساس	لا اضطراب	مهلة التوريد الاسمية	التكلفة والمخزون والتوافر

			المرجعي
S1 - السعر	السعر ×2 أو ×3	تكلفة الوحدة	LCC، ميزانية الصيانة
S2 - مهلة التوريد	مهلة التوريد ×2	T_procurement	خطر نفاد المخزون
S3 - المورد	توقف المورد الرئيسي 6 أشهر	القدرة البديلة	تغطية المخزون، التفكيك لاستخدام القطع
S4 - التصدير	تقييد 12 شهراً من الدولة المهيمنة	الإمداد الأولي	الزمن حتى النقص، التكلفة الإضافية
S5 - التقادم	إيقاف دائم للإنتاج	T_recovery	إعادة التصميم، التأهيل، الشراء النهائي
S6 - صدمة مزدوجة	تقادم + قيد على المادة	الترابط	مرونة النظام وزمن الاستعادة

يمكن إضافة محاكاة مونت كارلو عندما تُعرف توزيعات مهلة التوريد والاستهلاك والأعطال. والهدف ليس التنبؤ بالجيوسياسة، بل قياس حساسية نظام الصيانة تجاه اضطرابات معقولة.

12. الآثار التشغيلية والصيانية والتعاقدية والاستراتيجية

12.1 سياسة المخزون

ينبغي استكمال التقسيم التقليدي ABC حسب القيمة بتقسيم قائم على المرونة. فقد يستحق مكوّن منخفض التكلفة وغير قابل للاستبدال تغطية استراتيجية أعلى مما تشير إليه قيمة شرائه. وينبغي التمييز بين المخزون الاقتصادي، ومخزون السلامة التشغيلي، ومخزون المرونة الاستراتيجي.

12.2 تعدد المصادر والتأهيل المسبق

ليست زيادة المخزون دائماً الخيار الأكثر متانة. فبالنسبة إلى بعض القطع، يمكن للتأهيل المسبق لمصدر ثانٍ أن يقلل T_recovery بفاعلية أكبر. ويعتمد التدبير الأنسب على معدل الأعطال، وتغطية المخزون، وزمن التأهيل، وهيكل الموردين. كما تفيد Alstom بأن عدم الاستقرار الجيوسياسي دفعها إلى تطوير شبكة موردين عبر مختلف القارات التي تخدمها، بهدف محدد هو تقليل التعرض لحالات حظر الاستيراد بين الدول [6].

12.3 المتطلبات التعاقدية

- مدة دعم مضمونة للقطع والمكونات
- إشعار مبكر بالتقادم
- تحديد العناصر الحرجة أحادية المصدر
- الوصول إلى قائمة المواد (BOM) والمعلومات المادية ذات الصلة
- مصدر ثانٍ مؤهل أو خطة تأهيل
- التزامات مخزون المورد والحدود القصوى لمهل التوريد
- حقوق الإصلاح والبيانات التقنية والأدوات
- حوكمة إعادة التصميم وتقاسم التكاليف
- أحكام الشراء النهائي قبل إيقاف الإنتاج ونهاية العمر
- إعادة التدوير والاسترجاع ودائرية المواد الحرجة

12.4 حوكمة المرونة والاستقلالية الاستراتيجية

بالنسبة إلى الأصول التي تدعم وظيفة تنقل أساسية، ينبغي إدارة المرونة كقدرة تشغيلية لا كمسألة شراء فقط. وعلى المشغل رسم خريطة الاعتماديات الحرجة، وتحديد المراجع أحادية المصدر، وفهم أزمنة إعادة التأهيل، والحفاظ على قدرات الإصلاح ذات الصلة، وتحديد حجم المخزون الاستراتيجي قياساً إلى زمن الاستعادة لا إلى الاستهلاك التاريخي وحده.

على المستوى الوطني أو مستوى الشبكات الكبرى، تتمثل أكثر التدابير هيكلية في التنويع الجغرافي، والتأهيل المسبق للمصادر البديلة، والسيطرة على البيانات التقنية وحقوق الإصلاح، والقدرة الإقليمية على التجديد، والدائرية، وعمليات الشراء النهائية المنظمة، والمتطلبات التعاقدية الخاصة بالإشعار بالتقادم واستمرارية الدعم. وليس الهدف تصنيع كل مكوّن محلياً، بل منع حلقة خارجية وحيدة وغير قابلة للاستبدال من تعطيل وظيفة تنقل أساسية لمدة غير مقبولة.

13. المناقشة والحدود وأجندة البحث

13.1 الحدود الحالية

- نادراً ما تكون قوائم المواد التفصيلية للسكك الحديدية علنية؛ ولا يمكن إثبات كثير من التركيبات إلا ببيانات المصنع الأصلي.
- تصف البيانات الاقتصادية الكلية مادة أو بلداً، لا توافر درجة سككية محددة.
- لا تمثل الأسعار مقياساً مباشراً للنقص المادي.
- تختلف البنى اختلافاً كبيراً بين المصنعين والأجيال وأنظمة الكهربة.
- قد يكون الاستبدال ممكناً تقنياً لكنه بطيئاً اقتصادياً أو تعاقدياً أو تنظيمياً.
- يجب نمذجة تفكيك الأصول لاستخدام قطعها، والإصلاح، والمخزون المشترك بصورة منفصلة.
- يبقى RMCVI إطاراً استكشافياً للفرز الأولي؛ وما زالت الأوزان والعتبات وأداء الترتيب تحتاج إلى المعايرة والتحقق الصناعي.

13.2 المساهمة المقترحة

لا تتمثل الأصالة في إثبات وجود مواد حرجة - فهذا مثبت بالفعل - بل في صياغة كيفية تحول الحرجية الأولية إلى خطر على صيانة السكك الحديدية. وتتمثل المساهمة المقترحة في طريقة لترتيب أزواج المادة-المكوّن بحسب قدرتها على خلق نفاد في المخزون، وزيادة MDT، وإضعاف المرونة التشغيلية عندما تكون خدمة أساسية معنية.

13.3 فرضيات للاختبار

الفرضية	العبارة
H1	التركّز الجغرافي وحده لا يتنبأ جيداً بحرجية التشغيل والصيانة من دون متغيرات الاستبدال والتأهيل.
H2	صرامة التأهيل مضاعف رئيسي لقابلية التأثر في الإمداد.
H3	المواد الاستهلاكية سريعة الحركة وقطع الغيار التأمينية بطيئة الحركة تحتاج إلى سياسات مرونة مختلفة.
H4	سياسة المخزون المبنية فقط على الاستهلاك التاريخي

	تقلل من تقدير صدمات الإمداد النظامية.
H5	تصنيفات المواد الاقتصادية الكلية تختلف عن تصنيفات الحرجية الوظيفية في السكك الحديدية.
H6	يمكن لتعدد المصادر المؤهل أن يقلل قابلية التأثر بكفاءة أكبر من زيادة المخزون بعد أفق معين.

14. الخاتمة

تظهر قابلية تأثر سلاسل إمداد المواد والمكونات الحرجة كقضية صناعية ملموسة بصورة متزايدة. وتبين بيانات 2025-2026 تركّزاً في التكرير، وتوسع القيود التجارية، وفروقاً إقليمية في الأسعار، واستراتيجيات لاستبدال المواد لدى مصنعي السكك الحديدية [1،2،6]. وتضع وكالة الطاقة الدولية المواد الحرجة الآن في قلب أجندات الأمن الاقتصادي والوطني [1]، فيما يعالج القانون الأوروبي كلاً من مرونة إمداد المواد الحرجة ومرونة كيانات النقل بالسكك الحديدية [20،24].

بالنسبة إلى المشغل والمسؤول عن الصيانة، يجب ألا يُختزل الموضوع أبداً إلى «معدن حرج = قطعة غير متاحة». بل ينبغي إثبات السلسلة الكاملة حتى الوظيفة السككية، وتقييم خيارات الإصلاح والاستبدال، ومقارنة تغطية المخزون بزمن الاستعادة والتأهيل. وبعد ذلك فقط يصبح من المشروع تقييم الآثار على خدمة أساسية، وعند الاقتضاء، على الاستقلالية الاستراتيجية في التنقل.

العبارة الختامية
لن يكون على صيانة السكك الحديدية مستقبلاً أن تجيب فقط عن سؤال «متى سيتعطل هذا الأصل؟»، بل أيضاً: «عندما يتعطل، هل سيظل لدينا وصول إلى القطعة والمادة والمورد والبيانات التقنية وقدرة الإصلاح وزمن التأهيل اللازم لإعادة الخدمة؟». وبالنسبة إلى وظائف التنقل الأساسية، تصبح قدرة الاستعادة هذه مكوّناً عملياً من المرونة الوطنية والاستقلالية الاستراتيجية.

تقترح هذه الورقة إطاراً استكشافياً لتوصيف أوجه قابلية التأثر المرتبطة بالمواد والمكونات الحرجة في السكك الحديدية. وتتمثل مساهمتها الرئيسية في ربط الحرجية الأولية بالتشغيل والصيانة، وزمن الاستعادة، والتوافر التشغيلي، وعندما تكون الوظيفة السككية أساسية، باستمرارية التنقل الاستراتيجي. ويبقى RMCVI فرضية منهجية تحتاج إلى المعايرة والتحقق على بيانات صناعية؛ وهو ليس مؤشراً معيارياً، ولا مقياساً للسيادة، ولا نموذجاً تنبؤياً مثبتاً.

الملحق أ - قائمة الاتحاد الأوروبي للمواد الخام الحرجة الـ34 (تقييم 2023؛ والحالة الاستراتيجية مواءمة مع اللائحة (EU) 2024/1252)

ملاحظة تنظيمية: تتوافق الأسماء والحالات مع اللائحة (EU) 2024/1252، الملحقين الأول والثاني. كل المواد الخام الاستراتيجية حرجة، لكن ليست كل المواد الخام الحرجة استراتيجية. وبالنسبة إلى بعض العائلات، ترتبط الحالة الاستراتيجية صراحة بدرجة أو استخدام محدد، مثل الليثيوم والمنغنيز والغرافيت والنيكل والبورون والعناصر الأرضية النادرة للمغناطيسات الدائمة [20].

المادة الخام الحرجة (اللائحة EU 2024/1252)	الحالة الاستراتيجية - الملحق الأول
الأنتيمون	حرجة فقط
الزرنيخ	حرجة فقط
البوكسيت / الألومينا / الألومنيوم	استراتيجية
الباريت	حرجة فقط
البريليوم	حرجة فقط
البزموت	استراتيجية
البورون / البورات	استراتيجية بالنسبة إلى البورون بدرجة ميتالورجية
الكوبالت	استراتيجية
فحم الكوك	حرجة فقط
النحاس	استراتيجية
الفلسبار	حرجة فقط
الفلورسبار	حرجة فقط
الغاليوم	استراتيجية
الجرمانيوم	استراتيجية
الهافنيوم	حرجة فقط
الهيليوم	حرجة فقط
العناصر الأرضية النادرة الثقيلة	استراتيجية جزئياً: عناصر أرضية نادرة للمغناطيسات الدائمة (Tb، Dy، Gd)
العناصر الأرضية النادرة الخفيفة	استراتيجية جزئياً: عناصر أرضية نادرة للمغناطيسات

	الدائمة (Nd، Pr، Sm، Ce)
الليثيوم	استراتيجية لدرجة البطاريات
المغنيسيوم	استراتيجية لمعدن المغنيسيوم
المنغنيز	استراتيجية لدرجة البطاريات
الغرافيت الطبيعي	استراتيجية للغرافيت بدرجة البطاريات
النيكل - درجة البطاريات	استراتيجية - درجة البطاريات
النيوبيوم	حرجة فقط
صخر الفوسفات	حرجة فقط
الفوسفور	حرجة فقط
معادن مجموعة البلاتين	استراتيجية
السكانديوم	حرجة فقط
معدن السيليكون	استراتيجية
السترونشيوم	حرجة فقط
التنتالوم	حرجة فقط
معدن التيتانيوم	استراتيجية
التنغستن	استراتيجية
الفاناديوم	حرجة فقط

يعيد هذا الملحق عرض قائمة الفرز في الاتحاد الأوروبي. ولا يعني ذلك أن جميع المواد الـ34 موجودة أو حرجة في نظام سكك حديدية معين. ويجب إثبات الاستخدام السككي من خلال قائمة مواد (BOM) أو ورقة بيانات تقنية أو مصدر قطاعي محدد [4].

الملحق ب - مصفوفة الفرز الأولي للسكك الحديدية

النظام الفرعي	المكوّن	المادة / العائلة	الدليل	المصدر الأدنى	البيانات المطلوبة
البانتوغراف	شريحة كربون	كربون؛ نحاس بحسب الدرجة	E3	Mersen + أدبيات التآكل	الاستهلاك، المخزون، الدرجات المعتمدة

التقاط التيار من السكة الثالثة	حذاء التقاط	كربون/نحاس بحسب الدرجة	E3	Mersen	الاستهلاك، المخزون، الموردون
الجر	محرك PM	Nd/Pr/Dy/Tb بحسب المغناطيس	E3	IEA + Alstom	نوع المحرك، المغناطيس، قطع غيار الدوار/المحرك
الجر	محرك SynRM	لا مغناطيسات أرضية نادرة في الدوار	E3	Mitsubishi	إمكان تعديل محدود على الأساطيل القائمة
الجر	محول إلكتروني	SiC	E3	Europe's Rail + منشورات	مرجع الوحدة، المورد، إعادة التصميم
طاقة الجر	محول كهربائي	نحاس أو ألومنيوم	E3	Alstom	التصميم الفعلي، دورة الإصلاح
الأنظمة الكهربائية	كابلات/موصلات	نحاس/ألومنيوم	E2/E3	تكنولوجيا راسخة	الدرجات، المقاطع، المعايير، الموردون
تخزين الطاقة	حزمة بطارية	Li + مواد بحسب الكيمياء	E3/E2	Hitachi + كيمياء تحتاج إلى تأكيد	الخلية، الكاثود، BMS، الحزمة
الإشارات	لوحات إلكترونية	Ga/Ge/In/Ta/Sn وغيرها محتملة	E1	BOM مطلوبة	مراجع أشباه الموصلات، التقادم
المسار	قضبان/سبائك	V/Nb/Mn وغيرها بحسب الدرجة	E1	شهادة مادة	الدرجة الدقيقة ومصدر التوريد
معدات الحركة	عجلات/محاور	سبائك وفق المواصفة	E1	شهادة مادة	المسبك/ الحدادة، المورد،

					التأهيل
الفرملة	بطانات/أقراص	تركيبات مملوكة	E1	ورقة بيانات مادة	التركيب والمصدر الثاني

الملحق ج - البيانات الخام وقابلية إعادة إنتاج الأشكال

الأشكال الكمية 1 و2 و3 و4 و7 هي عمليات إعادة بناء من المؤلف استناداً إلى بيانات مؤسسية؛ أما الأشكال 5 و6 و8 فهي مفاهيمية. ويسجل الجدول القيم المستخدمة لدعم قابلية إعادة الإنتاج.

الشكل	البيانات الخام	المصدر الدقيق	التحويل	الحالة
1	2011=14؛ 2014=20؛ 2017=27؛ 2020=30؛ 2023=34	JRC-RMIS [4]	رسم مباشر	معاد البناء
2	المعادن الأساسية نحو +33%؛ الليثيوم >+100%؛ الكوبالت نحو +130%؛ التنغستن 6×	IEA 2026، الملخص التنفيذي [1]	يناير 2025=100: 133؛ ≥200؛ 230؛ 600	معاد البناء؛ ليست أسعاراً مطلقة
3	2023=70%؛ 2025=72%	IEA 2026، الملخص التنفيذي [1]	رسم مباشر؛ العناصر الأرضية النادرة مستبعدة	معاد البناء
4	10%؛ 40%؛ 25%؛ 65%	اللائحة (EU) 2024/1252، المادة 5 [20]	عتبات تنظيمية	معاد البناء
5	لا يوجد	نموذج المؤلف	مخطط سببي	مفاهيمي
6	لا يوجد	المؤلف + [20،24-27]	مخطط سببي	مفاهيمي

7	التعدين نحو 60%؛ التكرير=91%؛ المغناطيسات الملبدة=94%	IEA Rare Earth Elements 2026 [2]	حصص 2024	معاد البناء
8	لا يوجد	نموذج المؤلف	مقارنة مفاهيمية	مفاهيمي

المراجع

مبدأ اختيار المصادر
تستبعد الببليوغرافيا النهائية مجمّعات السوق والمحتوى غير المحرر والمدونات كلما أمكن دعم الادعاء بمصدر مؤسسي أو معياري أو علمي أو صناعي أولي. كما استُبعدت الادعاءات غير القابلة للتتبع بشأن هيكل تكلفة تصنيع شرائح البانتوغراف والانتقال التلقائي لتكلفة المواد إلى سعر البيع.

بروتوكول التعزيز والنشر

للنشر العلمي الأوسع أو لتقديم لاحق إلى مجلة، يمكن توسيع corpus المصادر ليشمل Scopus وWeb of Science وIEEE Xplore. وإذا قُدم العمل لاحقاً بوصفه مراجعة منهجية، فينبغي توثيق عبارات البحث، ومعايير الإدراج والاستبعاد، والفترة الزمنية، ومعالجة التكرارات باستخدام منهج من نوع PRISMA. وتعطي هذه النسخة عمداً الأولوية للمصادر المؤسسية والمعايير والمنشورات العلمية والمصادر الصناعية الأولية القادرة على التحقق من علاقات المادة-المكوّن وسياق 2025-2026.

[1] International Energy Agency (IEA). (2026). Global Critical Minerals Outlook 2026. Paris: IEA. Published 16 July 2026. Key data used: Executive Summary (price developments; refining concentration) and Outlook (2035 copper supply balance). https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2026 (accessed 25 August 2026).
[2] International Energy Agency (IEA). (2026). Rare Earth Elements — Executive Summary. Paris: IEA. Data used: 2024 shares for magnet-rare-earth mining, refining and sintered permanent-magnet production. https://www.iea.org/reports/rare-earth-elements/executive-summary (accessed 25 August 2026).
[3] European Commission. (2026). Critical Raw Materials Act: securing sustainable supply chains for Europe. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en (accessed 25 August 2026).
[4] European Commission, Joint Research Centre (JRC). (2026). Raw Materials Information System (RMIS) — EU Critical Raw Materials. JRC. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials (accessed 25 August 2026).
[5] U.S. Geological Survey (USGS). (2026). Mineral Commodity Summaries 2026. Reston, VA: U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2026 (accessed 25 August 2026).
[6] Alstom. (2026, 22 May). Resilience in railways: the art of developing future-proof trains in an uncertain world. Alstom. https://www.alstom.com/press-releases-news/2026/5/resilience-railways-art-developing-future-proof-trains-uncertain-world (accessed 25 August 2026).
[7] Mersen. (n.d.). Pantograph Contact Strips — Power Transfer for Rail. Mersen. https://www.mersen.com/en/products/power-transfer-products-rail/pantograph-contact-strips (accessed 25 August 2026).
[8] Hitachi Rail. (n.d.). Battery Commuter Trains. Hitachi Rail. https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/rolling-stock/battery-powered-trains/battery-commuter-trains/ (accessed 25 August 2026).

[9] Mitsubishi Electric. (2025, 3 October). Railcar Motor System Wins R&D 100 Award — SynTRACS. Mitsubishi Electric. https://www.mitsubishielectric.com/en/pr/2025/1003/ (accessed 25 August 2026).
[10] Europe's Rail Joint Undertaking. (2024). Towards more efficient, Silicon Carbide-based traction systems. Europe's Rail JU. https://rail-research.europa.eu/latest-news/towards-more-efficient-silicon-carbide-based-traction-systems/ (accessed 25 August 2026).
[11] Zhi, X., Zhou, N., Wei, H., Chen, H., Cheng, Y., Sun, Y., Zhao, L., Huang, G., et al. (2025). Analysis of the abnormal wear of the pantograph contact strip through combined experimental and simulation approaches. Scientific Reports, 15, Article 45706. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28380-0.
[12] Paul, S., et al. (2022). State-of-the-art review of railway traction motors for distributed traction considering South Korean high-speed railway. Energy Reports, 8, 14623–14642. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.411.
[13] Yıldırım, D., Akşit, M. H., Çadırcı, I., & Ermiş, M. (2022). All-SiC Traction Converter for Light Rail Transportation Systems: Design Methodology and Development of 165 kVA Prototype. Electronics, 11(9), 1438. https://doi.org/10.3390/electronics11091438.
[14] Saad, E., Besbes, M., Bourgeois, V., Czmil, V., & Zolghadri, M. (2026; first online 4 October 2025). A New Hybrid Approach for Identifying Obsolescence Features: Applied to Railway Signaling Infrastructure. In Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility (TRAconference 2024), Lecture Notes in Mobility, pp. 174–180. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04774-8_26.
[15] Driessen, M. A., Arts, J. J., van Houtum, G.-J., Rustenburg, J. W., & Huisman, B. (2015). Maintenance spare parts planning and control: a framework for control and agenda for future research. Production Planning & Control, 26(5), 407–426. https://doi.org/10.1080/09537287.2014.907586.
[16] Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. Mathematical Modelling, 9(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8.
[17] Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). (1975). The Delphi Method: Techniques and Applications. Reading, MA: Addison-Wesley.
[18] International Energy Agency (IEA). (2024). Recycling of Critical Minerals — Executive Summary. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals/executive-summary (accessed 25 August 2026).
[19] King, J., & Gugala, O. (2018, 9 July). Effective Reliability, Availability, Maintainability (RAM) and Safety (S), Principles and Guidelines for Large Subsurface Metro and Main Line Projects. Crossrail Learning Legacy / ICE Publishing. https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/effective-reliability-availability-maintainability-ram-and-safety-s-principles-and-guidelines-for-large-subsurface-metro-and-main-line-projects/ (accessed 25 August 2026).
[20] European Parliament & Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1252 of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials. Official Journal of the European Union, L, 2024/1252, 3 May 2024. Relevant provisions: Arts. 3–5, 20–24; Annex I; Annex II. ELI: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj (accessed 25 August 2026).
[21] International Energy Agency (IEA). (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025 (accessed 25 August 2026).
[22] British Standards Institution (BSI). (2024). BS EN 50126-1:2017+A1:2024, Railway applications — The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) — Part 1: Generic RAMS process. London: BSI.
[23] Mersen. (n.d.). Spare Parts — Power Transfer for Rail. Mersen. https://www.mersen.com/en/products/power-transfer-products-rail/spare-parts (accessed 25 August 2026).
[24] European Parliament & Council of the European Union. (2022). Directive (EU) 2022/2557 of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC. Official Journal of the European Union, L 333, 27 December 2022, pp. 164–198. Relevant rail scope: Annex, sector 5 (Transport), subsector rail. ELI: http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj (accessed 25 August 2026).
[25] European Railway Clusters Initiative (ERCI). (2023–2026). LEADER 2030 — Learnings for European Autonomy to Deliver Europe's Rail in 2030. Europe's Rail Joint Undertaking project, call HORIZON-ER-JU-2022-ExpIR-06. https://www.eurailclusters.com/erci_project/leader-2030/ (accessed 25 August 2026).
[26] European Railway Clusters Initiative (ERCI). (2026, 17 April). LEADER 2030 concluded with a final conference at the European Parliament: "From supply risks to strategic autonomy". Conference held 8 April 2026. ERCI. https://www.eurailclusters.com/leader-2030-concluded-with-a-final-conference-at-the-european-parliament/ (accessed 25 August 2026).
[27] General Secretariat of the Council of the European Union. (2026, 5 June). A strategic approach for the European railway industry. Note 10057/1/26 REV 1, TRANS 383, AOB for the Transport, Telecommunications and Energy Council meeting of 8 June 2026; information from Austria, Croatia, France, Germany, Greece, Italy, Luxembourg, Poland, Portugal and Romania. Brussels, pp. 1–3. Relevant passages: p. 1 on transport sovereignty, critical-infrastructure resilience and strategic autonomy; pp. 2–3 on security of supply and critical dependencies. https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10057-2026-REV-1/en/pdf (accessed 25 August 2026).