

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

# Matériaux critiques :

---

*la contrainte physique que le scénario tout-électrique ignore*

Cuivre · Lithium · Cobalt · Nickel · Terres rares · Dépendances géopolitiques · Alternatives

*Juin 2026 — Sources : AIE Global Critical Minerals Outlook 2025 · IRENA · ADEME · La Fabrique de l'industrie · Commission européenne*

# 1. Le paradoxe fondamental — une transition bas-carbone très intensive en matériaux

La transition énergétique mondiale est présentée comme une sortie de la dépendance aux ressources naturelles. Elle en est en réalité une substitution : on remplace la dépendance au pétrole, au gaz et au charbon par une dépendance aux métaux et minéraux critiques. La différence structurelle majeure est que les combustibles fossiles se consomment et se renouvellent par les marchés, alors que les matériaux s'accumulent dans les équipements et ne se reconstituent pas.

## Le chiffre qui illustre l'ampleur du défi

Selon l'AIE, la quantité cumulée d'acier, de cuivre et d'aluminium nécessaire en 2050 pour concevoir les unités de production renouvelables mondiales pourrait atteindre « 6 à 11 fois la production mondiale totale » de 2010. La fabrication d'un véhicule électrique requiert en moyenne 394 kg de matériaux critiques (aluminium, cobalt, cuivre, graphite, lithium, manganèse et nickel), soit 2,2 fois plus que pour un véhicule thermique (176 kg). Source : WWF / Institut Mobilités en Transition, 2023.

## 1.1 La demande mondiale va exploser simultanément dans tous les pays

Le débat national sur les matériaux critiques commet une erreur de cadrage récurrente : il traite le problème pays par pays, alors que la compétition est mondiale et simultanée. La France, l'Allemagne, les États-Unis, la Chine, l'Inde, le Japon, la Corée du Sud se précipitent vers les mêmes mines, les mêmes usines de raffinage, les mêmes fournisseurs — au même moment.

Matériau	Demande 2023	Croissance demandée d'ici 2030	Croissance demandée d'ici 2040	Usage principal transition
<b>Lithium</b>	+ 30 %/an ces 2 dernières années	Multiplié par 3 à 4	Multiplié par 6 à 8 (déficit 2,9x en 2040)	Batteries VE et stockage
<b>Cobalt</b>	+ 10–15 %/an	Double	Multiplié par 3 à 4	Batteries NMC
<b>Nickel</b>	+ 8–12 %/an	Double à triplé	Multiplié par 4	Batteries haute densité
<b>Graphite</b>	+ 8–10 %/an	Multiplié par 4	Multiplié par 6 à 8	Anodes batteries
<b>Cuivre</b>	+ 3,2 % en 2024	+ 50 % d'ici 2035	Demande 42 Mt en 2040 vs offre 24 Mt	VE, éoliennes, réseaux électriques
<b>Terres rares</b>	+ 8–15 %/an	Double	Double à triplé	Aimants éoliennes, moteurs VE
<b>Lithium (DMCC 2025)</b>	Référence 2020	—	Multiplié par 75 d'ici 2050	Batteries toutes technologies

La demande de lithium a crû de 30 % par an ces deux dernières années, soit trois fois plus vite que les projections précédentes. L'AIE confirme dans son rapport Global Critical Minerals Outlook 2025 que l'offre n'arrive pas à suivre, malgré une augmentation des investissements miniers de 10 % en 2023.

## 2. Le cuivre — le déficit le plus immédiat et le plus certain

Le cuivre est le matériau dont le déficit est le mieux documenté et le plus proche dans le temps. Il n'est pas substituable à l'échelle des usages de la transition énergétique — les alternatives électriques de l'aluminium sont partielles et plus lourdes. C'est un élément transversal à toutes les technologies de la transition.

### 2.1 Ce que la transition consomme en cuivre

Équipement	Contenu en cuivre	Comparaison
Véhicule électrique BEV	51 à 100 kg (selon études)	Contre 20 à 25 kg pour un thermique — facteur 3 à 4x
Véhicule hybride ÉREV (batterie 20-25 kWh)	25 à 35 kg (estimé)	Contre 80-100 kg pour un BEV — facteur 2 à 3x économisé
Borne de recharge rapide (150 kW)	~50 kg	Chaque station de 4 bornes : ~200 kg de cuivre
Éolienne terrestre 5 MW	~10 à 15 tonnes	Par GW installé : 2 000 à 3 000 tonnes
Éolienne offshore 15 MW	~40 à 50 tonnes + câble sous-marin	Par GW installé : 3 000 à 5 000 tonnes + câble
Câble électrique haute tension (km)	5 à 10 tonnes/km	Déploiement réseau RTE : centaines de GW-km nécessaires
Panneau solaire 1 MWc	~5 à 6 tonnes	Par GW installé : 5 000 à 6 000 tonnes

### 2.2 L'équation offre-demande

L'AIE publie dans son rapport Global Critical Minerals Outlook 2025 un constat sans équivoque sur le cuivre : c'est le matériau pour lequel les « préoccupations majeures » sont les plus pressées.

- Production minière mondiale 2024 : 22 millions de tonnes.
- Demande mondiale 2024 : 27 millions de tonnes de cuivre raffiné (+ 3,2 % vs 2023).
- Capacité d'approvisionnement projetée 2035 hors recyclage : 21,8 millions de tonnes.
- Demande projetée 2035 : 28,3 millions de tonnes — déficit structurel de 6,5 Mt.
- Demande projetée 2040 : 42 millions de tonnes — contre une offre minière qui culmine à ~24 Mt fin des années 2020 puis DÉCLINE sous 19 Mt en 2035 en raison de la baisse des teneurs en minerai.

#### La contrainte physique irréductible : les délais miniers

L'ouverture d'une mine de cuivre prend en moyenne 15 à 16 ans entre la découverte d'un gisement et la production industrielle (études géologiques, permis environnementaux, construction d'infrastructure, montée en charge). Les mines qui produiront du cuivre en 2035 sont soit déjà en production, soit déjà en construction. Les décisions d'investissement prises aujourd'hui ne produiront de cuivre qu'après 2038-2040. L'AIE estime qu'il faudrait 800 milliards de dollars d'investissements miniers supplémentaires d'ici 2040 pour éviter le déficit — un niveau jamais atteint historiquement.

### 2.3 Les facteurs aggravants non énergétiques

La transition énergétique n'est pas le seul vecteur de croissance de la demande de cuivre. Trois autres moteurs s'y ajoutent simultanément :

- Intelligence artificielle et data centers : les data centers consommeront 1,1 million de tonnes de cuivre par an d'ici 2030, soit près de 3 % de la demande mondiale. Un data center moderne requiert jusqu'à 10 fois la charge électrique d'une installation classique.
- Réarmement mondial : la hausse des tensions géopolitiques entraîne une course aux armements. Les armements modernes (drones, robots, systèmes de communication, infrastructures militaires) sont très intensifs en cuivre.
- Urbanisation du Sud global : la Chine, l'Inde, l'Afrique et l'Asie du Sud-Est construisent des villes et des réseaux électriques à un rythme sans précédent, indépendamment de la transition énergétique occidentale.

### 3. La concentration géopolitique — une dépendance structurelle

La dépendance aux matériaux critiques n'est pas seulement quantitative (il en faut beaucoup plus) — elle est aussi géographique et politique. Les ressources sont concentrées dans un petit nombre de pays, et le raffinage est encore plus concentré.

Matériau	Pays dominants (extraction)	Chine (raffinage/transformation)	Risque géopolitique
<b>Lithium</b>	Australie, Chili, Argentine	50 % du raffinage mondial. Prévoit 60 %+ en 2035	Moyen — ressources réparties mais raffinage concentré
<b>Cobalt</b>	RDC : 63 % de la production mondiale	Entreprises chinoises dominent les mines RDC	Très élevé — double concentration
<b>Graphite</b>	—	> 50 % de la production mondiale + 80 % des batteries en 2030	Extrêmement élevé
<b>Terres rares</b>	Chine : production + raffinage dominants	90 % du raffinage mondial. 70 % des terres rares	Critique — arme stratégique utilisée
<b>Cobalt raffiné</b>	—	Chine : part majoritaire	Très élevé
<b>Manganese</b>	—	Chine : 70 %	Très élevé
<b>Cuivre</b>	Chili, Pérou, RDC, Indonésie	Influence croissante	Modéré — ressources réparties
<b>Gallium, Germanium</b>	—	Chine : 100 % (restriction export. 2023)	Arme utilisée
<b>Aimants permanents (NdFeB)</b>	—	Chine : 87 % capacité raffinage	Utilisé : restrictions 2025

#### 3.1 La Chine comme levier stratégique — une arme déjà utilisée

La Chine a progressivement transformé son contrôle sur les matériaux critiques en levier géopolitique. Ce n'est plus une hypothèse — c'est une réalité déjà documentée :

- Juillet 2023 : restrictions d'exportation sur le germanium et le gallium (semi-conducteurs et électronique de défense).
- Août 2024 : antimoine ajouté à la liste des restrictions.
- Début 2025 : tungstène, molybdène, indium, tellure, bismuth ajoutés.
- Avril 2025 : restrictions sur 7 terres rares lourdes et les aimants permanents — arrêts de production documentés dans l'industrie automobile européenne.
- Été 2025 : graphite naturel, matériaux de batteries LFP et technologies de raffinage du lithium ajoutés.
- Plan quinquennal 2035 : la Chine prévoit de fournir 60 %+ du lithium et cobalt raffinés, 80 % du graphite et terres rares de qualité batterie, 70 % du manganèse.

#### Le parallèle avec la dépendance au gaz russe

En 2021, l'Europe s'était convaincue que la dépendance au gaz russe était gérable car « les marchés fonctionnent ». Elle a découvert en 2022 que la dépendance à un fournisseur unique d'un bien stratégique crée une vulnérabilité existentielle. La dépendance aux matériaux critiques chinois reproduit exactement ce schéma —

avec des substituts encore plus difficiles à trouver que le GNL américain, et des délais de diversification de 15 à 20 ans au lieu de 2 à 3 ans. La Chine a, de plus, déjà commencé à utiliser cet outil, contrairement à la Russie en 2021.

## 4. Contenu en matériaux par technologie — les ordres de grandeur

Comparer les technologies de transition entre elles sur leur contenu en matériaux critiques permet d'identifier les voies qui minimisent la dépendance tout en contribuant à la décarbonation.

Technologie	Lithium (kg)	Cobalt (kg)	Nickel (kg)	Cuivre (kg)	Terres rares (kg)	Total mat. critiques
<b>BEV (batterie 75 kWh NMC)</b>	8–10	12–18	40–60	80–100	0,5–1	~394 kg total VE
<b>ÉREV (batterie 20-25 kWh)</b>	2–3	3–5	10–18	25–35	0,3–0,5	~150–180 kg estimé
<b>Hybride simple (HEV)</b>	~0	~0	~2–3	~25–30	0,5–1	~180 kg VT + composants
<b>Véhicule bio-GNV thermique</b>	0	0	0	~20–25	0	Minimal
<b>Éolienne terrestre (par MW)</b>	0	0	0	10–15 t	0,1–0,2 t	Acier et cuivre surtout
<b>Solaire PV (par MWc)</b>	0	0	0	5–6 t	0	Silicium et cuivre
<b>Unité méthanisation/pyrogazification</b>	0	0	0	Très faible	0	Acier, béton, électronique courant

Un parc de 30 millions de BEV en France (remplacement total du parc thermique) nécessiterait environ 240 000 à 300 000 tonnes de lithium, 360 000 à 540 000 tonnes de cobalt, 1,2 à 1,8 million de tonnes de nickel, 2,4 à 3 millions de tonnes de cuivre — rien que pour les batteries. En ajoutant les infrastructures de recharge, les réseaux et les énergies renouvelables associées, ces chiffres doublent. La France ne représente que 1 % de la demande mondiale — multipliez par 100 pour l'échelon planétaire.

## 5. La stratégie Résilience — minimiser la dépendance sans renoncer à la décarbonation

L'enjeu n'est pas de s'opposer à l'électrification — elle est nécessaire, particulièrement pour les usages de courte distance et les process à basse température. C'est de la calibrer en fonction des contraintes physiques réelles, et de développer en parallèle des vecteurs énergétiques qui ne dépendent pas des mêmes chaînes d'approvisionnement. C'est précisément l'approche du Programme Résilience.

### 5.1 La logique de la substitution progressive

Étape	Action	Matériaux critiques mobilisés	Effet sur la dépendance
<b>Phase 1 (maintenant – 2030)</b>	Développer le biométhane (méthanisation + pyrogazification) et la mobilité ÉREV bio-GNV	Acier, béton, électronique courant — aucun matériau critique rare	Souveraineté totale sur la ressource : biomasse nationale
<b>Phase 2 (2025 – 2035)</b>	Développer le solaire (surfaces artificialisées) et prolonger le nucléaire existant	Cuivre, silicium, acier — pas de lithium ni cobalt	Dépendance limitée, gisement cuivre nécessaire mais gérable
<b>Phase 3 (2030 – 2045)</b>	Convertir les usages gaz non-mobiles vers électricité au rythme de la disponibilité réelle	PAC : cuivre, aluminium — peu de matériaux critiques	Le gaz libéré par cette conversion renforce le stockage et la mobilité lourde
<b>Phase 4 (2035 – 2050)</b>	Déployer l'éolien offshore et les batteries de stockage stationnaire	Cuivre, terres rares (éoliennes), lithium (stockage)	Basé sur une indépendance première : le biométhane est déjà sécurisé

### 5.2 L'argument de souveraineté — le point le plus différenciant

Le biométhane produit par méthanisation et pyrogazification de la biomasse nationale présente un profil de matériaux radicalement différent de toutes les autres technologies énergétiques :

- Acier : produit en France et en Europe, hors toute dépendance stratégique.
- Béton : production locale, ressource abondante.
- Électronique de contrôle : composants courants, disponibles de multiples sources.
- Zéro lithium, zéro cobalt, zéro terres rares, zéro graphite de qualité batterie.
- Ressource première : biomasse nationale non délocalisable, non embargable, non soumise aux tensions géopolitiques.

Un pays qui dispose d'un stock de biométhane national stocké dans son réseau souterrain est énergétiquement souverain quel que soit l'état des marchés mondiaux de matériaux. C'est une position stratégique que le tout-électrique ne peut pas offrir.

#### L'avantage comparatif de l'ÉREV face au BEV pur dans ce contexte

Un ÉREV avec une batterie de 20-25 kWh consomme 2 à 3 fois moins de lithium, cobalt et nickel par véhicule qu'un BEV de 75 kWh. À parc équivalent de 15 millions de véhicules, c'est une économie de 60 000 à 100 000 tonnes de lithium, 100 000 à 200 000 tonnes de cobalt, 300 000 à 600 000 tonnes de nickel — soit des dizaines de milliards d'euros de matériaux soustraits à la compétition mondiale. Et son prolongateur au biométhane national garantit l'autonomie longue distance sans

dépendre d'une infrastructure de recharge rapide massive (elle-même très consommatrice en cuivre).

## 6. Les atouts spécifiques de la France

La France dispose de plusieurs atouts qui renforcent la pertinence d'une stratégie minimisant la dépendance aux matériaux critiques importés.

Atout	Description	Avantage stratégique
<b>Réseau GRDF (130 TWh de stockage)</b>	Capacité de stockage souterrain de gaz parmi les plus importantes d'Europe	Stockage saisonnier sans batterie, sans lithium, sans cuivre supplémentaire
<b>Biomasse nationale (262 TWh potentiel)</b>	Gisement lignocellulosique et organique humide considérable et non exploité	Matère première domestique, aucune dépendance étrangère
<b>Nucléaire existant</b>	61 GW d'électricité pilotable sans émissions CO <sub>2</sub>	Armature du système sans besoin de stockage massif
<b>Projets lithium nationaux</b>	Lithium géothermal en Alsace, projet Imerys Échassières (Allier)	Réduction partielle de la dépendance à l'horizon 2030
<b>Tissu industriel méthanisation</b>	300+ sites opérationnels, filière en développement	Déjà existant, extensible sans rupture technologique
<b>Hydraulique (26 GW)</b>	Stockage et pilotabilité sans matériaux critiques	Complément idéal au biométhane pour l'équilibre réseau

### 6.1 Le risque de ne pas agir sur les matériaux

Si la France s'engage dans un scénario tout-électrique forcé, les risques sont :

- Renchérissement massif des véhicules électriques si les prix des matériaux explosent par pénurie, rendant la transition inaccessible à une large part de la population.
- Blocage de la transition énergétique par des ruptures d'approvisionnement décidées à Pékin ou dans des pays politiquement instables.
- Reproduction à plus grande échelle de la dépendance énergétique — cette fois aux matériaux plutôt qu'aux combustibles, avec moins de substituts disponibles.
- Coûts de réseau considérables pour absorber une électricité intermittente massive sans stockage saisonnier adéquat.

## 7. Le nucléaire — le moins gourmand en matériaux critiques rares, mais pas sans besoins

Toute analyse honnête des matériaux de la transition doit inclure le nucléaire. Il consomme lui aussi des matériaux en quantités considérables — béton, acier, zirconium, cuivre. Mais rapporté à l'énergie produite sur toute la durée de vie, et en l'absence quasi totale de matériaux critiques rares (lithium, cobalt, terres rares), son profil est structurellement différent des ENR variables.

### 7.1 Ce que consomme un réacteur nucléaire EPR

Un EPR de 1 650 MW mobilise : 300 000 m<sup>3</sup> de béton, 42 000 tonnes d'acier spécial, du zirconium pour les gaines de combustible, de l'uranium enrichi (chaîne maîtrisée par Orano), des quantités limitées de cuivre pour le câblage. Sur 60 ans avec un facteur de charge de 80 %, un EPR produit environ 700 TWh d'électricité.

Technologie	Béton (t/TWh produit)	Acier (t/TWh produit)	Mat. critiques rares	Source
<b>Nucléaire EPR (60 ans, FC 80 %)</b>	~1 300 t/TWh	~60 t/TWh	Zéro lithium, cobalt, terres rares	US Dept of Energy / Wikipedia
<b>Éolien terrestre (25 ans, FC 23 %)</b>	~11 000 t/TWh (x 8,5)	~1 800 t/TWh (x 30)	Terres rares (aimants), cuivre	US Dept of Energy
<b>Éolien offshore (25 ans, FC 38 %)</b>	~6 000 t/TWh (x 4,5)	~900 t/TWh (x 15)	Terres rares, cuivre élevé + câble	Estimé par analogie
<b>Solaire PV (25 ans, FC 14 %)</b>	~3 000 t/TWh (x 2,3)	~400 t/TWh (x 6,5)	Silicium, argent, indium (certaines techno)	Connaissance des énergies, ADEME

#### Le ratio clé (US Department of Energy + Connaissance des énergies)

1 MW de solaire PV mobilise 10 fois plus d'acier et 12 fois plus de cuivre que 1 MW nucléaire — alors que ce dernier fournit 3 à 5 fois plus d'énergie par MW installé compte tenu des facteurs de charge. Le nucléaire est de loin la technologie la moins gourmande en matériaux par TWh produit sur toute la durée de vie. Ce n'est pas un argument idéologique — c'est une réalité physique documentée.

### 7.2 Ce que le nucléaire ne consomme pas

- Lithium : zéro. Aucune batterie de stockage massive nécessaire.
- Cobalt : zéro. Aucune dépendance.
- Terres rares : zéro sur les REP français (aucun aimant permanent).
- Graphite de qualité batterie : zéro.
- Uranium : ressource gérable — la France maîtrise la chaîne d'enrichissement via Orano et dispose de stocks stratégiques de plusieurs années. La dépendance géopolitique est nettement moins critique que pour le cobalt congolais ou les terres rares chinoises.

### 7.3 La limite honnête à formuler

Le nucléaire consomme des matériaux abondants et non critiques (béton, acier ordinaire) mais aussi des aciers spéciaux (16MND5, 18MND5) dont la fabrication est exigeante et dont la maîtrise industrielle française a souffert du désinvestissement des décennies précédentes (défaillances Creusot Forge documentées). Il génère des déchets radioactifs dont la gestion sur le très long terme (Cigéo) mobilise des ressources additionnelles en béton et acier spéciaux — à intégrer honnêtement dans le bilan. Enfin, les

délais de construction — Flamanville 3 en est l'exemple le plus désolant : 17 ans pour un EPR — posent la question de la disponibilité à temps.

## 7.4 Le rôle du nucléaire dans la stratégie Résilience

- Armature pilotable du système : puissance disponible sur demande 24h/24, quelle que soit la météo, sans batteries massives et donc sans lithium ni cobalt supplémentaires.
- Réducteur de pression sur les matériaux : chaque GW nucléaire maintenu évite d'installer 4 à 5 GW d'éolien ou 5 à 6 GW de solaire, avec tout le cuivre et les infrastructures réseau associés.
- Binôme souverain avec le biométhane : nucléaire (uranium via Orano) + biométhane (biomasse nationale) forment un couple pilotable et quasi-souverain, sans dépendance aux matériaux critiques importés de zones géopolitiquement instables.
- Maintien du parc existant jusqu'en 2045-2050 : prolonger les 56 réacteurs actuels au-delà de 50 ans réduit massivement les besoins en nouveaux matériaux par rapport à un scénario de fermeture et remplacement par des ENR.

## 8. Conclusion — Une transition énergétique réaliste doit intégrer la contrainte matérielle

La transition énergétique mondiale est physiquement nécessaire. Mais sa forme dominante actuellement planifiée — tout-électrique, tout-batterie, tout-connecte — ignore une contrainte physique majeure : elle requière des volumes de matériaux critiques que les mines mondiales ne peuvent pas fournir dans les délais annoncés, provenant de zones géopolitiquement fragiles ou déjà sous contrôle d'un adversaire stratégique.

Question	Scénario tout-électrique	Scénario Résilience (hybride bio-GNV + électricité)
<b>Dépendance matériaux</b>	Très élevée — lithium, cobalt, terres rares, cuivre en quantités massives	Faible pour la mobilité (ÉREV) — cuivre pour l'électrique, zéro pour le biométhane
<b>Souveraineté énergétique</b>	Dépendance Chine pour raffinage + pays instables pour extraction	Biomasse nationale : 0 % de dépendance extérieure
<b>Stockage saisonnier</b>	Problème non résolu — batteries insuffisantes à cette échelle	Réseau GRDF 130 TWh déjà disponible
<b>Résilience aux crises</b>	Vulnérable aux restrictions d'export de matériaux	Résilient — ressource première nationale
<b>Accessibilité économique</b>	Risque de renchérissement si pénurie de matériaux	Moins dépendant des cours mondiaux
<b>Faisabilité à horizon 2035</b>	Fortement compromise par les délais miniers	Déployable avec les ressources et industries existantes
<b>Emploi local</b>	Import de matériaux = import de valeur	Production biomasse et biométhane = emplois ruraux territoriaux

### Le message pour les décideurs publics

Une stratégie énergétique nationale qui ignore la contrainte matérielle mondiale est une stratégie incomplète. La question n'est pas « électrique ou gaz » — c'est « quelle part d'électrique et quelle part de biométhane, dans quel ordre, pour quelle finalité ? ». Une transition par substitution progressive — biométhane national pour la mobilité lourde et le stockage saisonnier, électrique pour les usages courts et les process basse température, au rythme de la disponibilité réelle — est plus robuste, plus souveraine, et moins exposée aux aléas d'un marché mondial de matériaux que ni la France ni l'Europe ne contrôlent.

*Sources : AIE Global Critical Minerals Outlook 2024 et 2025 · IRENA Geopolitics of the Energy Transition · La Fabrique de l'industrie (2025) · ADEME · WWF / Institut Mobilités en Transition (2023) · Commission européenne (Critical Raw Materials Act) · Annales des Mines (novembre 2025) · DMCC (février 2025) · Juin 2026*