



LA TRANSITION MATÉRIELLE AUTOMOBILE

Comment l'électrification transforme les flux de véhicules hors d'usage en Europe
— et ce qu'ils valent

Paris, mars 2026

Table des Matières

1.	La « mine urbaine » automobile.....	4
2.	Synthèse	5
3.	Le déclencheur réglementaire.....	8
4.	La transition en chiffres	9
4.1	Le parc automobile et la vague BEV.....	9
4.2	Ce qui change dans une voiture.....	11
5.	Le dividende économique et environnemental.....	15
5.1	Le creux de transition : un passage à vide temporaire	15
5.2	Le dividende CO ₂	18
6.	Sur le terrain	20
6.1	Une usine en transition	20
6.2	La mine urbaine à trois échelles	22
7.	Points clés	24
8.	Annexe	25

Glossaire

Acronyme	Terme complet
BEV	Véhicule électrique à batterie (Battery Electric Vehicle)
ICE	Véhicule à moteur thermique (Internal Combustion Engine)
ELV	Véhicule hors d'usage (VHU)
PGM	Métaux du groupe platine (Pt, Pd, Rh)
REE	Terres rares (Nd, Dy)
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive

1. La « mine urbaine » automobile

Un véhicule électrique à batterie arrivant en fin de vie contient **1 257 € de matériaux récupérables** – soit **18% de plus qu'un véhicule thermique équivalent** (1 068 €). La base de valeur se déplace des métaux du groupe platine, volatils, vers des marchés de matières premières profonds et liquides : l'aluminium et le cuivre représentent ensemble 87% de la valeur de récupération d'un BEV. Le pot catalytique disparaît ; à sa place, 250 kg d'aluminium, 60 kg de cuivre et 390 grammes d'aimants en terres rares entrent dans la filière de recyclage par véhicule.

Rapporté à 249 millions de voitures particulières européennes, le parc automobile devient une réserve minérale roulante – une « mine urbaine ». Son contenu en cuivre, projeté à 220–250 kt/an récupérables d'ici 2045, couvrirait 5–7% de l'approvisionnement européen, dans un contexte de déficits mondiaux projetés atteignant 1,6 à 10 millions de tonnes par an. De l'atelier de production – où une seule usine française de groupes motopropulseurs en transition identifie déjà 2,6 millions d'euros par an de valeur récupérable dans ses déchets – au parc continental, le secteur automobile est assis sur un gisement dont la teneur s'améliore, et non l'inverse.

Mais le calendrier détermine qui capte cette valeur. Les véhicules mis à la casse en 2035 ont été immatriculés 15 à 20 ans plus tôt, quand la part des BEV était de 1 à 5%. Seulement 10% des véhicules hors d'usage seront d'origine BEV en 2035 – et la géographie crée une asymétrie d'une décennie : l'Allemagne atteint 19% de BEV dans son flux de VHU, la France seulement 4,7%, malgré des taux d'adoption identiques aujourd'hui. Cette étude quantifie ce que la transition matérielle change, quand, et ce qu'elle vaut – en euros, en CO₂ évité, et sur le terrain industriel.

2. Synthèse

L'électrification n'appauvrit pas le flux de véhicules hors d'usage. Elle le transforme. Un véhicule électrique à batterie arrivant en fin de vie vaut **1 257 € en matériaux récupérables – 18% de plus qu'un véhicule thermique équivalent (1 068 €)**. La base de valeur se déplace des métaux du groupe platine, volatils, vers des marchés de matières premières profonds et liquides : l'aluminium et le cuivre représentent ensemble 87% de la valeur de récupération d'un BEV (*véhicule électrique à batterie*).

D'ici 2035, l'enrichissement BEV du flux de VHU génère une valeur matérielle incrémentale estimée à **~106 millions d'euros par an** à l'échelle de l'UE27 – contribution directe des ~562 000 VHU d'origine BEV attendus annuellement, chacun portant une prime de 189 € par rapport à un véhicule thermique. Toutefois, ce gain est partiellement compensé par un creux démographique temporaire : les cohortes d'immatriculation faibles de l'ère COVID réduisent les volumes totaux de VHU d'environ 6%, et la disparition des pots catalytiques efface **355 millions d'euros de valeur de récupération des PGM (métaux du groupe platine (Pt, Pd, Rh))** (le « PGM cliff »). Le résultat net est un recul modéré de 9,2 milliards à 8,8 milliards d'euros de valeur de récupération totale EU27 – un creux de transition, et non une perte structurelle.

Le dividende environnemental est sans équivoque. La récupération matérielle des VHU au niveau EU27 évite **20,7 millions de tonnes de CO₂ par an** – équivalent au **retrait d'environ 4,5 millions de voitures particulières des routes européennes pendant un an**, soit environ **5% des émissions industrielles totales de l'UE**. Contrairement au bilan économique, ce dividende CO₂ résiste à la transition : l'aluminium, qui domine les émissions évitées (47% du total), est précisément le matériau dont la part progresse le plus sous l'effet de l'électrification.

Le calendrier est la variable critique. Seulement 10% des VHU sont d'origine BEV en 2035. L'inflexion réelle survient lorsque la part des BEV dépasse 25–30% du flux de VHU – projection autour de 2040–2045. **La géographie détermine qui y arrive en premier** : l'Allemagne, avec des durées de vie véhicule plus courtes (15,9 ans contre 20,3 ans pour la France), atteint 19% de BEV dans son flux de VHU dès 2035 et constitue le seul grand marché européen où la valeur totale de récupération augmente. La France, malgré des taux d'adoption BEV identiques aujourd'hui, n'atteint que 4,7% – un retard d'une décennie entière.

Pour les constructeurs, le levier Scope 3 est concret : le recyclage en boucle fermée de l'aluminium issu des retours VHU retire **90–120 ktCO₂ par an** du reporting amont pour un constructeur d'un million de véhicules – un poste à la fois quantifiable dès aujourd'hui et croissant à mesure que le contenu aluminium des BEV augmente.

Les constructeurs sans accords de recyclage en boucle fermée s'exposent à une double pénalité : ils achèteront de l'aluminium primaire à pleine intensité carbone (et à plein coût) tandis que leurs concurrents enregistreront des crédits de contenu recyclé sur leurs comptes Scope 3. À toutes les échelles – de l'usine de production au véhicule individuel jusqu'au parc continental – le secteur automobile devient une mine urbaine. Une seule usine

française de groupes motopropulseurs en transition identifie **2,6 millions d'euros par an** de valeur récupérable dans ses déchets. Chaque BEV arrivant en fin de vie contient **1 257 € de matériaux récupérables**. Le parc EU27 représente une réserve minérale roulante dont le seul contenu en cuivre — projeté à **220–250 kt/an** récupérables d'ici 2045 — couvrirait **5–7% de l'approvisionnement européen en cuivre**, dans un contexte de déficits mondiaux projetés atteignant 1,6 à 10 millions de tonnes par an d'ici 2035. Les mandats de contenu recyclé de l'ELV Regulation révisée (25% de plastiques recyclés à partir de 2036, avec des objectifs pour les métaux recyclés en discussion) font de ceci un risque de conformité, et non une simple opportunité d'optimisation.

Chiffres clés LE GISEMENT

249 millions

Voitures particulières dans le parc EU27 – la base du gisement

17,4%

Part BEV des nouvelles immatriculations UE (2025). France 20,0%, Allemagne 19,1%

+18%

par véhicule
Valeur de récupération BEV vs ICE : 1 257 € vs 1 068 €. Portée par l'aluminium (+79%) et le cuivre (+161%)

VALEUR & CO₂

106 M€/an

Valeur matérielle incrémentale issue de ~562 000 VHU BEV par an au niveau EU27 d'ici 2035

-355 M€

« PGM cliff » : perte de valeur de récupération des métaux du groupe platine à mesure que les pots catalytiques sortent du parc

20,7

MtCO₂/an

Émissions évitées par la récupération matérielle des VHU EU27 – équivalent au retrait de ~4,5 millions de voitures de la route

GÉOGRAPHIE & TERRAIN

Jusqu'à
120 ktCO₂/an

Réduction Scope 3 pour un constructeur d'1 M de véhicules via le recyclage en boucle fermée de l'aluminium

19% vs 4,7%

Part BEV du flux de VHU en 2035 : Allemagne vs France. Même adoption aujourd'hui, une décennie d'écart en fin de vie

€2,6 M€/an

Valeur récupérable des déchets d'une seule usine française de groupes motopropulseurs en transition

3. Le déclencheur réglementaire

Le secteur automobile européen fait face à une convergence réglementaire sans précédent. Les normes européennes de CO₂ imposent une **interdiction de fait des ventes de véhicules thermiques neufs (ICE) à partir de 2035**, l'**ELV Regulation** révisée (accord provisoire, décembre 2025) instaure des mandats de contenu recyclé et une responsabilité élargie des producteurs, et le **Battery Regulation** (2023/1542) encadre la collecte, le recyclage et les voies de seconde vie des batteries de traction dans un cadre juridique distinct.

Les coûts de non-conformité au titre de l'ELV Regulation révisée sont encore en cours de définition, mais le précédent est clair : le Battery Regulation impose des seuils plancher de contenu recyclé (16% cobalt, 6% lithium, 6% nickel d'ici 2031) avec des implications pour l'homologation. L'ELV Regulation devrait suivre la même architecture d'application.

Ensemble, ces trois instruments détermineront comment — et avec quelle rentabilité — les matériaux incorporés dans 249 millions de voitures particulières européennes seront récupérés au cours de la prochaine décennie.

Or la réalité matérielle du parc automobile accuse un retard d'une décennie ou plus sur le calendrier réglementaire. Les voitures vendues aujourd'hui n'atteindront leur fin de vie qu'à la fin des années 2030 ou dans les années 2040. Cette étude quantifie cet écart : ce qui change dans le flux de déchets, quand, et ce que cela vaut — en euros et en CO₂ évité.

Note: Tous les matériaux de batterie (lithium, cobalt, nickel, manganèse) sont exclus de cette analyse. Le pack batterie d'environ 400 kg par BEV, contenant approximativement 10 kg de Li, 12 kg de Co et 35 kg de Ni, relève des dispositions dédiées de collecte et de recyclage du Battery Regulation et est géré par une chaîne de valeur industrielle distincte. Inclure les matériaux de batterie dans l'analyse au niveau véhicule entraînerait un risque de double comptage.

4. La transition en chiffres

4.1 Le parc automobile et la vague BEV

Figure 1 : Vue d'ensemble du parc automobile européen – UE27, France, Allemagne (2025)

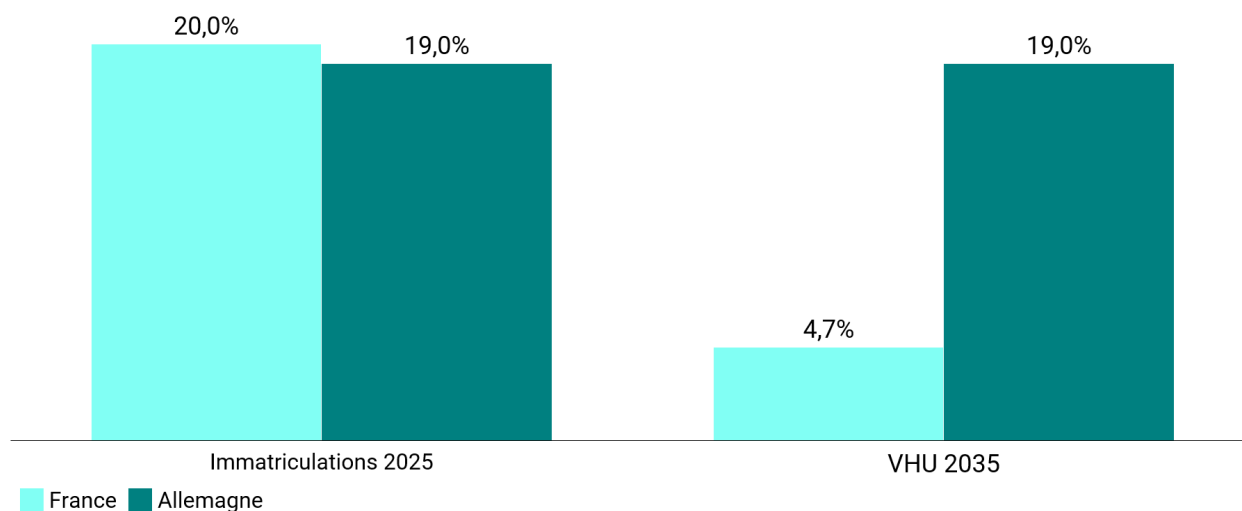
	EU 27 	France 	Allemagne 
Véhicules en circulation	~249 M	39,7 M	49,3 M
Nouvelles immatriculations (2025)	10 822 831	1 632 152	2 857 591
Dont BEV	1 880 370	326 922	545 142
Part BEV (2025)	17,4%	20,0%	19,1%
Âge moyen de sortie de parc	17,7 ans	20,3 ans	15,9 ans
Part BEV des VHU (2035 est.)	9,8%	4,7%	19,0%

Source : ACEA Pocket Guide 2025/2026, Eurostat

Le parc EU27 comprend environ **249 millions de voitures particulières**, avec 10,8 millions de nouvelles immatriculations en 2025. **Les véhicules électriques à batterie représentent désormais 17,4% des nouvelles immatriculations européennes**. La France et l'Allemagne adoptent les BEV à des vitesses quasi identiques – 20,0% et 19,1% respectivement – mais les durées de vie des véhicules divergent radicalement. L'âge moyen de sortie de parc en France est de **20,3 ans**, contre **15,9 ans** pour l'Allemagne, reflet de l'intensité d'exportation de véhicules d'occasion nettement supérieure de l'Allemagne.

L'écart entre ce qui entre dans le parc et ce qui en sort crée un décalage d'une décennie – et un facteur de différenciation stratégique entre marchés.

Figure 2 : Part BEV dans les nouvelles immatriculations vs véhicules hors d'usage – France vs Allemagne (% , 2025 vs 2035 est.)



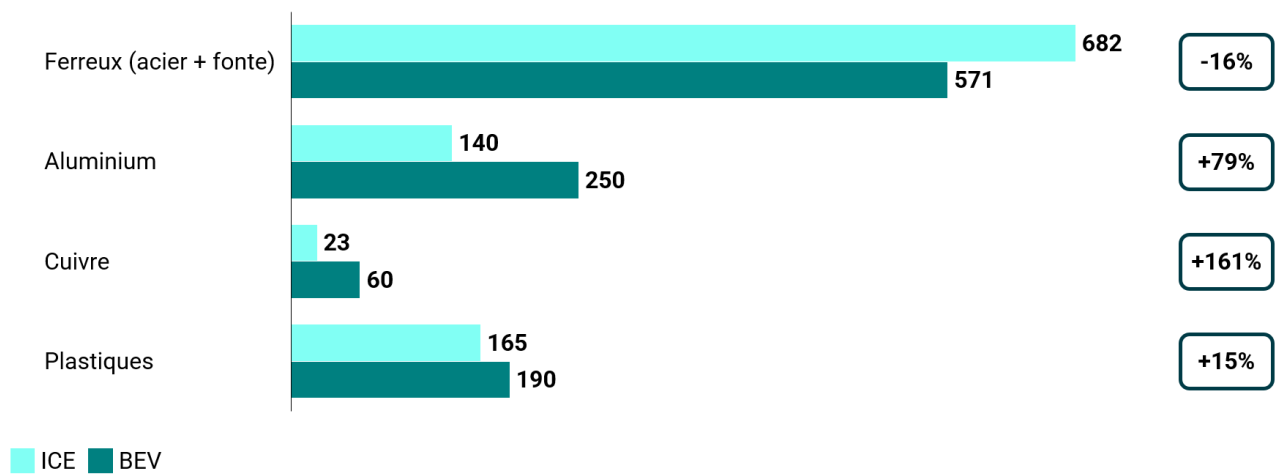
Source : ACEA, Eurostat, modèle de survie Weibull (scénario central)

La conséquence est un **paradoxe adoption–mise au rebut** : des taux d'adoption BEV identiques aujourd'hui produisent des résultats radicalement différents en fin de vie une décennie plus tard. D'ici 2035, le flux de VHU (ELV) allemand devrait contenir **19,0% de BEV**, faisant de l'Allemagne l'indicateur avancé européen de la transition matérielle. La France, avec seulement **4,7% de VHU BEV**, accuse un retard d'environ une décennie¹⁾. Au niveau EU27, les BEV ne représentent que **9,8%** du flux de VHU 2035 – l'effet de cohorte signifie que la transformation réelle se situe au-delà de 2035.

Note: 1) La part BEV du flux de VHU est déterminée par les cohortes historiques d'immatriculation, et non par les volumes de ventes actuels. Même avec une pénétration BEV de 90% dans les nouvelles immatriculations d'ici 2035, seuls ~12–13% des VHU EU27 seraient d'origine BEV, car les véhicules mis à la casse en 2035 ont été immatriculés 15 à 20 ans plus tôt, quand la part BEV était de 1 à 5%. Le point d'inflexion – lorsque la part BEV dépasse 25–30% des VHU – arrive autour de 2040–2045. Toutes les projections de cette étude utilisent des courbes de survie de Weibull calées sur les données Eurostat de parc par âge (2013–2024), et non des durées de vie supposées. Les creux d'immatriculation de l'ère COVID (2020–2021) réduisent indépendamment la cohorte totale de VHU atteignant la fin de vie autour de 2035 d'environ 6%, indépendamment du mix de motorisation.

4.2 Ce qui change dans une voiture

Figure 3.a : Composition matérielle : ICE vs BEV – principaux matériaux (kg par véhicule)



Source : JRC126564 (2023), Iglesias-Embil et al. (2025), ICCT Pocketbook 2025/26

Un véhicule électrique à batterie est plus lourd que son équivalent thermique (~1 700 kg contre ~1 400 kg), mais sa composition matérielle est fondamentalement différente. Les métaux ferreux reculent de **16%** (682 à 571 kg) avec la disparition du bloc moteur, de la boîte de vitesses et du système d'échappement. L'aluminium progresse de **79%** (140 à 250 kg), porté par les carters de moteur, les boîtiers d'onduleur et les enveloppes de batterie. Le cuivre augmente de **161%** (23 à 60 kg), reflétant le faisceau de câblage, les bobinages de stator et l'électronique de puissance du groupe motopropulseur électrique. Les plastiques augmentent de 15% (165 à 190 kg), tirés par l'isolation et le gainage des câbles.

Figure 3.b : Composition matérielle : ICE vs BEV – métaux traces (grammes par véhicule)

	ICE 	BEV 	Delta (%)
PGM ¹⁾ (Pt, Pd, Rh)	5,1g	0g	-100%
Terres rares (Nd, Dy)	33g	390g	+1 082%

Source : JRC126564 (2023), Iglesias-Embil et al. (2025), données de démontage industriel

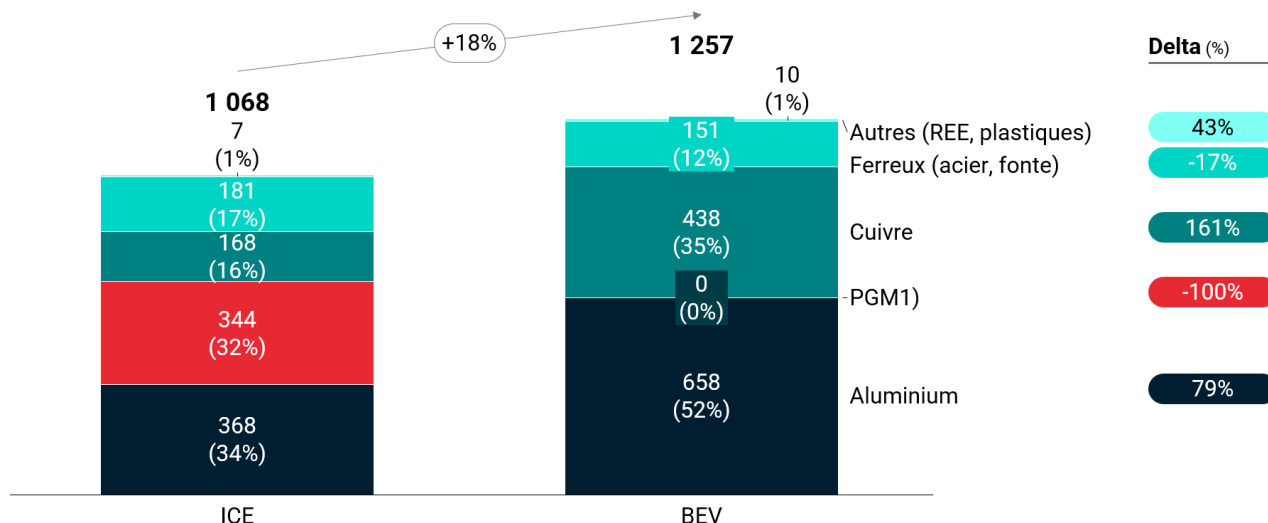
Au niveau des métaux traces, le basculement est encore plus marqué. Les métaux du groupe platine **disparaissent entièrement** (-100% : 5,1 g à 0 g) – pas de combustion signifie pas de pot catalytique. Les terres rares, principalement le néodyme et le dysprosium pour

les aimants permanents NdFeB des moteurs de traction, augmentent de plus de **1 000%** (33 g à 390 g). Il s'agit d'un changement qualitatif de la composition matérielle, et non simplement quantitatif : le flux de VHU passe d'une dépendance aux métaux précieux à une densité en métaux industriels.

La question est de savoir ce que ce basculement matériel vaut — par véhicule et à l'échelle du parc.

Notes: 1) PGM — Métaux du Groupe Platine : utilisés dans les pots catalytiques pour traiter les gaz d'échappement. Pas de combustion dans les BEV = pas de pot catalytique = zéro PGM.

Figure 4 : Valeur récupérable par véhicule hors d'usage — ICE vs BEV (€ par véhicule, prix de marché secondaire 2025)



Source : JRC126564 (2023), Iglesias-Embil et al. (2025), LME (2025), USGS MCS 2026

Un VHU d'origine BEV vaut 1 257 € contre 1 068 € pour un véhicule thermique — une prime de 18% (+189 € par véhicule). Plus important encore, la structure de valeur se transforme. Les PGM représentent 32% de la valeur de récupération ICE, concentrés dans seulement 5,1 grammes de métaux volatils et sous contrainte d'approvisionnement. Dans un BEV, l'aluminium et le cuivre représentent ensemble **87% de la valeur de récupération totale** — des marchés de matières premières profonds et liquides, avec une tarification transparente et des infrastructures de recyclage établies.

Le multiplicateur électronique

Au-delà du basculement des matériaux en masse, les BEV embarquent nettement plus de contenu électronique que les véhicules thermiques. Le jeu de données JRC126564 estime la masse totale des composants électriques et électroniques entre 25 et 82 kg par véhicule ICE (moyenne année-modèle 2013), la fourchette reflétant le segment et le niveau d'équipement. Les BEV ajoutent plusieurs sous-systèmes à haute valeur absents des véhicules thermiques : systèmes de gestion de batterie, électronique de puissance (onduleur, convertisseur DC-DC, chargeur embarqué) et contrôleurs de gestion thermique plus complexes.

Les circuits imprimés automobiles contiennent 14–24% de cuivre et des traces de métaux précieux (or à 0,09–0,42% en masse). L'application d'estimations hautes à la masse par véhicule suggère environ 12 kg de circuits imprimés par BEV contre ~4 kg pour un véhicule thermique typique — un triplement porteur d'une valeur significative en métaux de base et précieux. Cette fraction électronique croissante n'est pas encore systématiquement captée par les procédés conventionnels de broyage des VHU, optimisés pour la récupération de ferreux en masse.

Plastiques : le signal réglementaire

Les plastiques représentent moins de 1% de la valeur de récupération économique par véhicule et sont traités comme une catégorie agrégée dans cette étude. Aucune littérature publique ne désagrège actuellement les plastiques automobiles par type de polymère (PP, PA, ABS, PU) au niveau ICE-versus-BEV – une lacune que l'industrie devra combler à mesure que les mandats de contenu recyclé entreront en vigueur.

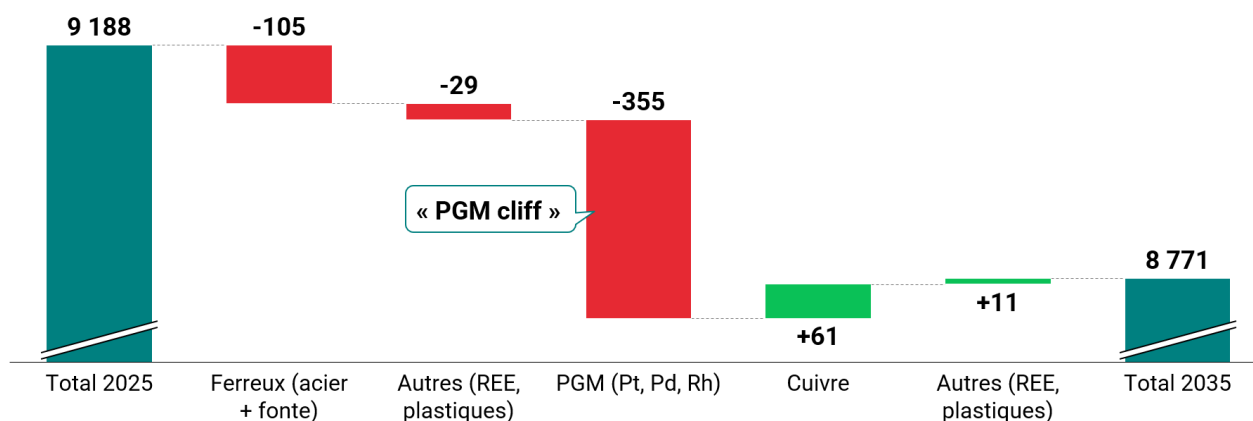
Cependant, le paysage réglementaire a changé. L'ELV Regulation révisée (accord provisoire, 12 décembre 2025) **introduit des objectifs obligatoires de contenu en plastique recyclé** pour les véhicules neufs : un minimum de 15% dans les six ans suivant l'entrée en vigueur, porté à 25% dans les dix ans. Sur ce total, **20% doit provenir du recyclage en boucle fermée** – des plastiques récupérés spécifiquement à partir de véhicules hors d'usage. **Le secteur automobile ne recycle actuellement que ~19% des plastiques de VHU**, avec plus de 800 000 tonnes par an finissant en décharge ou en incinération à travers l'Europe. L'écart entre le mandat de 25% et les taux de recyclage actuels représente à la fois une opportunité de marché et un défi d'infrastructure.

Sources: Parlement européen (12 déc. 2025) ; Conseil de l'UE (17 juin 2025) ; Forum économique mondial (avril 2025). Les données de composition ICE vs BEV par type de polymère ne sont pas disponibles dans la littérature publique.

5. Le dividende économique et environnemental

5.1 Le creux de transition : un passage à vide temporaire

Figure 5 : Valeur de récupération matérielle des VHU EU27 – variation par matériau, 2025 à 2035 (M€)



Source : Modèle stock-flux, prix ajustés au marché secondaire 2025 (LME, USGS MCS 2026)

Malgré l'enrichissement par véhicule, **la valeur totale de récupération des VHU EU27 recule de 9,2 milliards d'euros en 2025 à 8,8 milliards en 2035 (-417 M€, -4,5%)**. Cette contradiction apparente résulte de deux effets superposés. Premièrement, le **PGM cliff** : à mesure que les véhicules thermiques reculent dans le flux de VHU, la valeur de récupération des PGM chute de 355 millions d'euros — la plus forte variation par matériau, représentant 85% du recul total. Il s'agit d'un résultat modélisé de la projection stock-flux, et non d'une hypothèse. Il est confirmé directionnellement par le consensus industriel : le rapport 2025 de Johnson Matthey sur le marché des PGM prévoit une contraction de 5% de la demande automobile en platine et en palladium pour la seule année 2025, portée par la progression des parts de marché BEV. Le World Platinum Investment Council projette que le pic historique de la demande automobile en platine est déjà dépassé, avec une courbe de disponibilité VHU pour le platine culminant en 2025 puis déclinant.

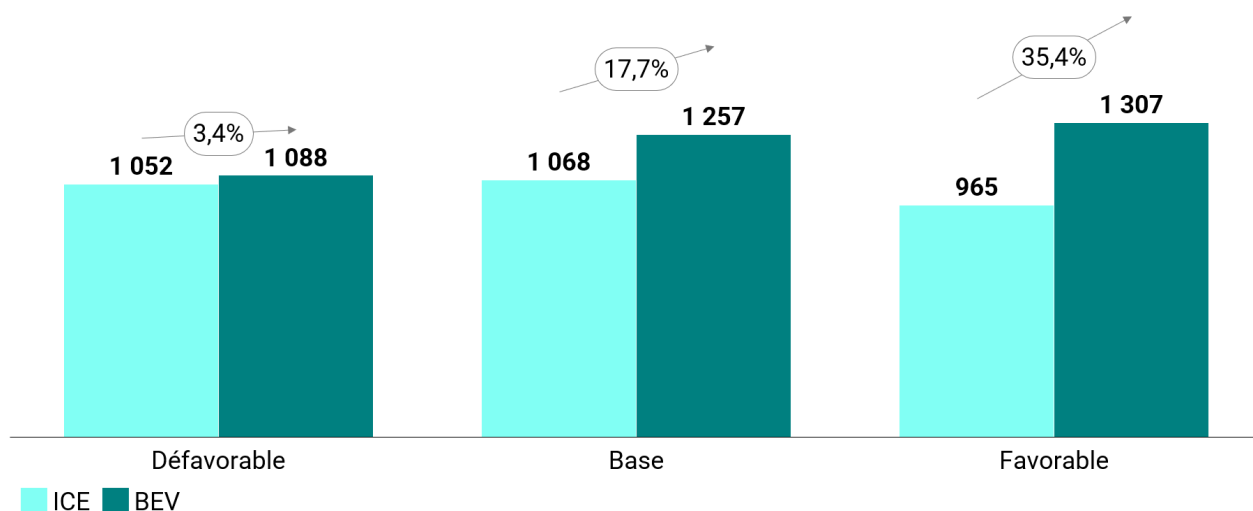
Deuxièmement, un **effet démographique** : les creux d'immatriculation de l'ère COVID (2020–2021) réduisent la cohorte totale de VHU atteignant la fin de vie autour de 2035 d'environ 6%. La prime BEV (+18% par véhicule) ne s'applique qu'à ~10% des VHU — insuffisant pour compenser.

Il s'agit d'un **effet de cohorte, et non d'un appauvrissement structurel**. Le nombre total de véhicules sortant du parc diminue temporairement, alors même que la valeur unitaire de chaque véhicule augmente. Le point de croisement — le moment où l'enrichissement BEV compense la perte PGM et le recul des volumes — arrive lorsque la part BEV des VHU dépasse environ 25–30%, projection autour de 2040–2045.

Sensibilité aux prix : la prime BEV tient

L'analyse ci-dessus utilise les prix 2025 ajustés au marché secondaire (LME, USGS MCS 2026) – pratique standard dans les études européennes d'économie des ressources (cf. FUTURAM, JRC), aucune prévision crédible des prix des matières premières n'existant au-delà de 3–5 ans. Pour tester la robustesse du constat d'enrichissement par véhicule, nous appliquons des scénarios de stress symétriques aux deux principaux moteurs de prix : aluminium et cuivre ($\pm 25\%$) et PGM ($\pm 50\%$, reflétant leur volatilité historique supérieure).

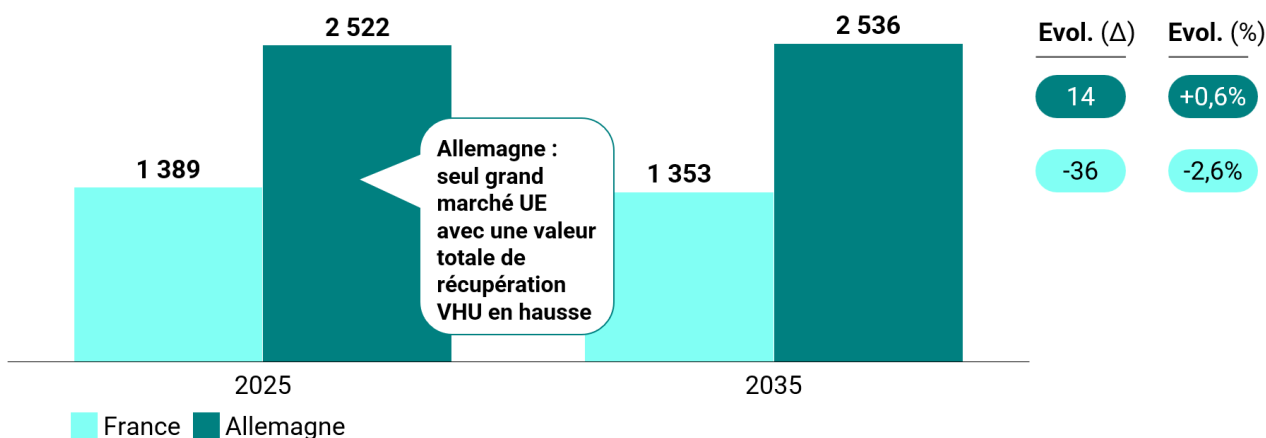
Figure 6 : Valeur récupérable par véhicule hors d'usage sous trois scénarios de prix (€ par véhicule)



Source : Modèle stock-flux. Prix de base : LME, USGS MCS 2026. Sensibilité : $\pm 25\%$ Al/Cu, $\pm 50\%$ PGM. Acier et plastiques maintenus constants

La prime BEV est positive dans les trois scénarios. Dans le scénario défavorable – les prix de l'aluminium et du cuivre chutent de 25% tandis que les PGM augmentent de 50% – un VHU d'origine BEV vaut toujours 36 € de plus qu'un véhicule thermique (+3%). Dans le scénario favorable, correspondant aux fondamentaux structurels attendus par la majorité des analystes (resserrement de l'offre de cuivre, prime de décarbonation sur l'aluminium, destruction de la demande de PGM), la prime s'élargit à 342 € par véhicule (+35%).

Figure 7 : Trajectoires de valeur de récupération des VHU – France vs Allemagne (M€, 2025–2035)

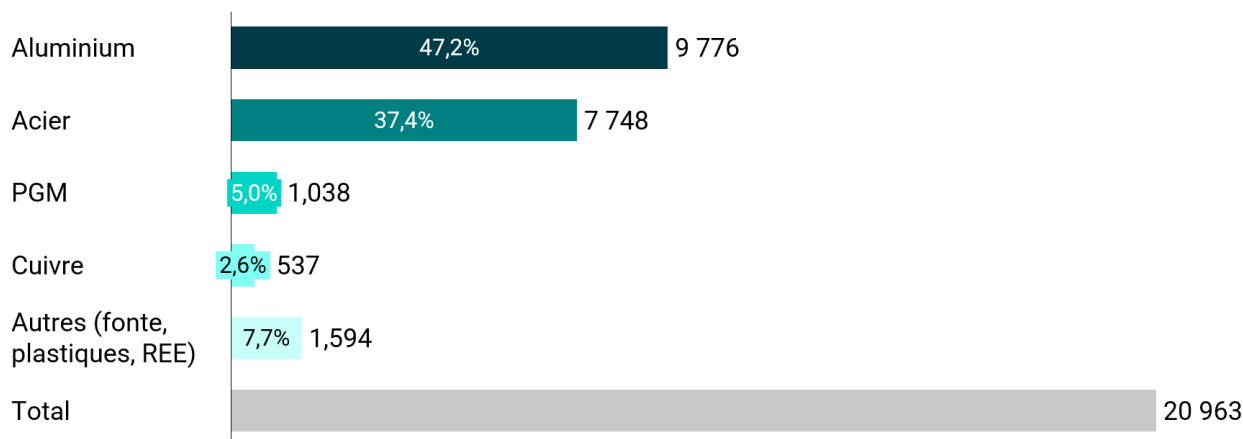


Source : Modèle stock-flux, prix ajustés au marché secondaire 2025 (LME, USGS MCS 2026). Scénario central

La divergence France–Allemagne illustre la dynamique de cohorte. La valeur totale de récupération des VHU français recule de 36 millions d'euros (–2,6%) : les VHU BEV arrivent trop lentement pour compenser l'érosion des PGM. **L'Allemagne est le seul grand marché européen où la valeur totale de récupération augmente** (+14 M€, +0,6%), les gains en aluminium (+72 M€) et en cuivre (+76 M€) compensant largement le recul des PGM. Les durées de vie véhicule plus courtes en Allemagne créent un point d'inflexion BEV plus précoce – faisant du pays le baromètre continental de la transition matérielle.

5.2 Le dividende CO₂

Figure 8 : CO₂ évité par la récupération matérielle des VHU – EU27 par matériau (ktCO₂, 2025)



Source : Différentiels de facteurs d'émission : IAI (Al 9,0 tCO₂/t), World Steel (Acier 1,65 tCO₂/t), ICA (Cu 3,0 tCO₂/t), IPA (PGM 25 000 tCO₂/t métal). Réseau : RTE France, UBA Allemagne

La récupération matérielle des VHU au niveau EU27 évite actuellement **20,7 millions de tonnes de CO₂ par an** — équivalent au retrait d'environ 4,5 millions de voitures particulières des routes européennes pendant un an, soit environ 5% des émissions industrielles totales de l'UE. L'aluminium domine le bilan CO₂ davantage encore que le bilan économique : **47,2% des émissions évitées totales** (9 776 ktCO₂), grâce à un différentiel de facteur d'émission de 9,0 tCO₂ par tonne de recyclé versus production primaire¹). L'acier suit à 37,4% (7 748 ktCO₂), porté par le volume brut plutôt que par l'intensité unitaire. Les PGM, malgré leur forte intensité CO₂ par gramme, ne représentent que 5,0% de l'évitement total.

Le dividende CO₂ et le dividende économique n'évoluent pas dans le même sens. La valeur totale de récupération des VHU EU27 recule de 4,5% à l'horizon 2035 (Section 5.1), mais le CO₂ évité reste globalement stable — car l'aluminium, le matériau au différentiel de facteur d'émission le plus élevé, est précisément celui dont la part progresse sous l'effet de l'électrification. Le PGM cliff détruit de la valeur économique mais a un impact limité en termes de CO₂. Inversement, les gains en aluminium et en cuivre sont riches en CO₂ évité.

Pour les constructeurs, l'implication Scope 3 est concrète. **Un constructeur produisant 1 million de véhicules par an avec un recyclage en boucle fermée de l'aluminium peut retirer environ 90–120 ktCO₂ par an de son reporting Scope 3 amont au titre de la CSRD** (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) — un poste significatif dans le reporting de durabilité. Cette estimation repose sur un contenu aluminium moyen de parc (140–250 kg par véhicule), des taux de récupération de 90% et les facteurs d'émission IAI pour l'aluminium primaire versus secondaire.

La France bénéficie d'un avantage structurel : son réseau électrique dominé par le nucléaire (55 gCO₂/kWh contre 350 gCO₂/kWh en Allemagne) produit de l'aluminium secondaire avec

des émissions d'environ 0,3 tCO₂/t contre 1,0 tCO₂/t en Allemagne — soit environ 65 ktCO₂/an d'évitement supplémentaire pour les opérations de recyclage basées en France.

Notes: 1) Les calculs de CO₂ évité utilisent des différentiels de facteurs d'émission moyens mondiaux par industrie (IAI pour l'aluminium : 9,0 tCO₂/t économisées ; World Steel pour l'acier : 1,65 tCO₂/t économisées), appliqués uniformément aux trois périmètres géographiques (EU27, France, Allemagne). Cela reflète la réalité selon laquelle l'aluminium primaire consommé en Europe provient d'une chaîne d'approvisionnement mondiale (Moyen-Orient, Norvège, Islande, Russie), et non de la production domestique. Le même facteur moyen UE est appliqué aux trois périmètres géographiques (EU27, France, Allemagne). La seule différenciation carbone par pays dans cette étude concerne les opérations de recyclage : le réseau nucléaire français (55 gCO₂/kWh) produit de l'aluminium secondaire à ~0,3 tCO₂/t contre ~1,0 tCO₂/t en Allemagne (350 gCO₂/kWh).

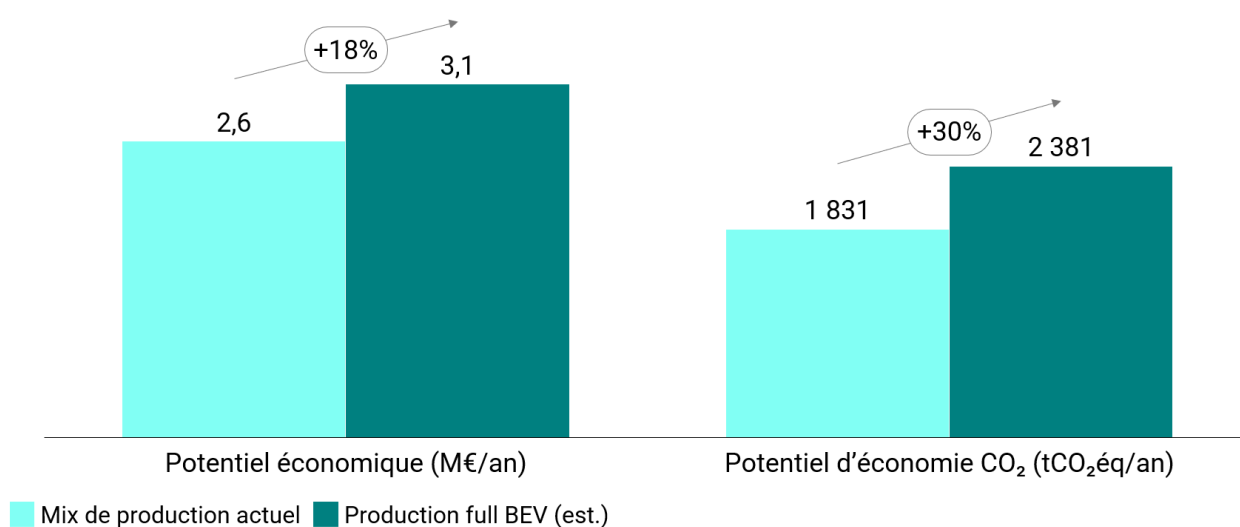
2) Cette estimation repose sur un contenu aluminium moyen de parc (140–250 kg par véhicule), des taux de récupération de 90% et les facteurs d'émission publiés par l'IAI pour l'aluminium primaire versus secondaire.

6. Sur le terrain

6.1 Une usine en transition

Une grande usine française de groupes motopropulseurs — en pleine transition de la production de moteurs thermiques vers l'assemblage de moteurs électriques — génère environ 4 400 tonnes de déchets de production par an¹⁾. En juillet 2025, l'usine a produit 363 tonnes, dont 73% ont été incinérées. L'analyse d'optimisation identifie **2,6 millions d'euros par an d'économies potentielles** et **1 831 tCO₂éq par an d'émissions évitées** grâce à un meilleur tri et une réaffectation des filières de recyclage.

Figure 9 : Potentiel estimé de valorisation des déchets pour une usine de groupes motopropulseurs en transition vers une production full BEV



Source : Données de base : plateforme de gestion des déchets (juillet 2025, mois unique, usine anonymisée). Prime économique (+18%) : différentiel de valeur récupérable par véhicule, ICE 1 068 € vs BEV 1 257 € (LME, USGS MCS 2026). Prime CO₂ (+30%) : différentiel de CO₂ évité par véhicule, ICE 2,40 vs BEV 3,13 tCO₂ (IAI, World Steel, ICA, IPA)

Notes: 1) (annualisé ; base mois unique — des variations saisonnières peuvent s'appliquer)

Dans un scénario de production full BEV, le potentiel économique s'élève à 3,1 millions d'euros par an (+18%) et les économies de CO₂ augmentent à 2 381 tCO₂éq par an (+30%). La prime CO₂ dépasse la prime économique car l'aluminium – le matériau dont la part progresse le plus dans la transition BEV – présente de loin le différentiel de facteur d'émission le plus élevé (9,0 tCO₂ par tonne). Cela reflète le constat au niveau macro : le dividende environnemental de la transition matérielle surpasse son dividende économique.

Figure 10 : Étude de cas usine – profil de déchets actuel vs évolution directionnelle sous production EV (usine de groupes motopropulseurs anonymisée en Europe de l'Ouest)

Dimension	Actuel (mesuré, juillet 2025)	Évolution directionnelle	Rationnel
Volume total de déchets	363 t/mois (~4 400 t/an)		Moins d'usinage lourd
Répartition des traitements	73% incinérés / 27% recyclés		Réoptimisation nécessaire
Flux métalliques dominants	Déchets d'usinage ferreux (copeaux de fonte, limaille d'acier)		En recul – remplacés par des bobinages cuivre, carters moteur aluminium
Contenu électronique	2,7% du total (9,9 t/mois)		En forte hausse (circuits imprimés, condensateurs, isolation)
Présence de terres rares	Négligeable		Émergence de boues de meulage d'aimants NdFeB
Valeur par tonne de déchet	Plus faible (dominé par les ferreux)		Plus élevée (cuivre, REE >> ferreux en €/t)
Infrastructure de récupération	Broyage en masse		Démontage de précision et séparation ciblée
Potentiel d'économie CO ₂	1 831 tCO ₂ éq/an		Jusqu'à 2 381 tCO ₂ éq/an en production full BEV (+30%)
Potentiel économique	~2,6 M€/an		Jusqu'à 3,1 M€/an en production full BEV (+18%)

Source : Plateforme de gestion des déchets (juillet 2025, mois unique). Évolution directionnelle fondée sur le delta de composition matérielle ICE vs BEV (JRC126564, Iglesias-Embil et al. 2025)

L'évolution directionnelle est claire : les déchets d'usinage ferreux (copeaux de fonte, limaille d'acier) – actuellement le flux métallique dominant – reculent à mesure que la production de moteurs thermiques s'éteint. À leur place émergent des bobinages de cuivre, des carters de moteur en aluminium, des déchets d'électronique de puissance (circuits imprimés, condensateurs) et des boues de meulage d'aimants NdFeB. Le tonnage total peut diminuer (moins d'usinage lourd), mais la **valeur par tonne de déchet augmente** car le cuivre et les terres rares commandent des prix de marché secondaire nettement supérieurs à ceux des métaux ferreux. L'infrastructure de récupération doit s'adapter en conséquence : du broyage en masse vers le démontage de précision et la séparation ciblée.

Le lien entre l'usine et le parc. L'augmentation de valeur par tonne au niveau de l'usine est directionnellement cohérente avec l'enrichissement par véhicule documenté en Section 4.2 (+18% par VHU). Les matériaux générant le plus fort évitement de CO₂ au niveau EU27 (aluminium, cuivre) sont précisément ceux dont la part croît dans le profil de déchets de l'usine – confirmant que l'argumentaire environnemental en faveur d'une récupération optimisée se renforce, et non s'affaiblit, sous l'effet de l'électrification.

6.2 La mine urbaine à trois échelles

Les données de l'usine ci-dessus illustrent un schéma plus large. Les sites de production automobile et les véhicules hors d'usage fonctionnent comme des gisements de matières premières secondaires — des mines urbaines — opérant à l'échelle industrielle. La transition de la production ICE vers BEV ne diminue pas ces gisements. Elle les enrichit.

Figure 11 : La mine urbaine à trois échelles

Usine	BEV	Parc UE
		
2,6 M€/an	1 257 €/véhicule	249 M véhicules
4 400 t de déchets récupérables, une seule usine de groupes motopropulseurs	Matériaux récupérables par BEV en fin de vie (+18% vs ICE)	Réserve minérale roulante. 179 kt Cu récupérées/an, en hausse vers 220–250 kt après 2035

Source : Plateforme de gestion des déchets (juillet 2025, anonymisée). Modèle stock-flux (LME, USGS MCS 2026). S&P Global, « The Future of Copper » (2022)

L'usine de production comme mine urbaine. L'usine française anonymisée génère environ 4 400 tonnes de déchets de production récupérables par an, avec un potentiel de récupération économique identifié de **2,6 millions d'euros annuels**. À mesure que l'usine passe de la production de moteurs thermiques à l'assemblage de moteurs électriques, le profil du gisement évolue : moins de déchets d'usinage ferreux en masse, davantage de bobinages de cuivre, de chutes d'aimants en terres rares et de déchets d'électronique de puissance — valeur par tonne plus élevée, tonnage total moindre, complexité des déchets accrue. L'usine ne génère pas des déchets. Elle exploite une mine dont la teneur du minerai évolue.

Chaque véhicule comme gisement mobile. Un BEV arrivant en fin de vie contient **1 257 €** en matériaux récupérables aux prix de marché secondaire actuels — 18% de plus qu'un véhicule thermique (1 068 €). Le parc EU27 d'environ 249 millions de voitures particulières représente une réserve minérale roulante. À mesure que le parc s'électrifie, cette réserve s'enrichit en métaux industriels (aluminium, cuivre) et s'appauvrit en PGM volatils — un gisement plus prévisible, plus liquide. D'ici 2035, les ~562 000 VHU BEV entrant dans les filières de récupération chaque année contribuent à environ **106 millions d'euros** de valeur matérielle incrémentale par rapport au même nombre de véhicules thermiques.

Le contexte de l'offre de cuivre. L'étude de S&P Global « The Future of Copper » (2022) projette un quasi-doublement de la demande mondiale de cuivre, de 25 millions de tonnes à environ 50 millions de tonnes d'ici 2035, porté par l'électrification, l'expansion des réseaux et le déploiement des véhicules électriques. Même dans le scénario d'approvisionnement le

plus optimiste, le marché fait face à un déficit persistant d'environ **1,6 million de tonnes par an** en 2035. Dans la tendance actuelle, le déficit atteint environ 10 millions de tonnes par an. Notre modèle place la récupération de cuivre des VHU EU27 à environ 179 kt/an en 2025. Après 2035, lorsque les BEV domineront le flux de VHU – chacun portant 60 kg de cuivre contre 25 kg pour un véhicule thermique – la récupération automobile de cuivre pourrait atteindre 220–250 kt/an d'ici 2045. Rapporté à la consommation européenne de cuivre d'environ 3,5 Mt/an, ce seul flux de recyclage représenterait **5–7% de l'approvisionnement total** – une contribution matérielle à la résorption du déficit d'approvisionnement projeté.

7. Points clés

Le compte à rebours réglementaire est déjà lancé. Les mandats de contenu recyclé de l'ELV Regulation prennent effet en 2036 — mais l'aluminium, le cuivre et les terres rares qui devront satisfaire ces mandats sont incorporés dans les véhicules vendus aujourd'hui. Les constructeurs qui attendent que le flux de VHU « rattrape son retard » se retrouveront en concurrence pour des matières secondaires qu'ils auraient pu sécuriser par des accords en boucle fermée une décennie plus tôt. L'interdiction des ventes ICE en 2035 est le coup d'envoi ; la transition matérielle est la course.

1. Enrichissement par véhicule

Un VHU d'origine BEV vaut 18% de plus qu'un véhicule thermique (1 257 € vs 1 068 €), sur des matériaux plus stables et de grade industriel (aluminium, cuivre) plutôt que des PGM volatils.

2. Creux temporaire

La valeur totale de récupération EU27 recule de 9,2 Md€ à 8,8 Md€ à l'horizon 2035 — un effet démographique et de début de transition, et non un appauvrissement structurel. La valeur par véhicule augmente tout au long de la période.

3. Calendrier

Seulement 10% des VHU sont d'origine BEV en 2035. L'inflexion réelle arrive lorsque la part BEV dépasse 25–30% des VHU — projection 2040–2045.

4. Géographie

L'Allemagne atteint 19% de VHU BEV en 2035 contre 4,7% pour la France — créant une asymétrie d'une décennie à partir de vitesses d'adoption identiques. Pour les constructeurs ayant une empreinte industrielle dans les deux pays, cela signifie que les usines allemandes accèderont aux matières secondaires BEV un cycle complet avant les opérations françaises. Les accords pionniers en Allemagne deviennent le modèle des stratégies de boucle fermée à l'échelle européenne.

5. Levier constructeur

Le recyclage en boucle fermée de l'aluminium issu des retours VHU retire 90–120 ktCO₂/an du reporting Scope 3 amont pour un constructeur d'un million de véhicules — quantifiable et reportable au titre de la CSRD.

6. Mine urbaine

De l'atelier de production au parc continental, la récupération matérielle automobile est un système fonctionnel de matières premières secondaires. La récupération de cuivre des VHU EU27 (179 kt/an aujourd'hui, en hausse vers 220–250 kt après 2035) couvre 5–7% de l'approvisionnement européen en cuivre — un apport significatif face aux déficits mondiaux projetés.

8. Annexe

MÉTHODOLOGIE & SOURCES

Modèle stock-flux : Courbes de survie de Weibull calées sur les données de distribution par âge d'Eurostat (2013–2024). Adoption BEV en courbe en S calibrée sur ACEA/AIE. Scénario central présenté tout au long du rapport.

Composition matérielle : JRC126564 (2023), Iglesias-Embil et al. (2025), ICCT Pocketbook 2025/26, Rosa & Terzi (2016).

Prix de marché secondaire : LME (2025), USGS MCS 2026. Décotes appliquées : Al -20%, Cu -10%, PGM -5% vs. métal raffiné. Analyse de sensibilité à $\pm 25\%$ Al/Cu, $\pm 50\%$ PGM. World Bank Commodity Markets Outlook (oct. 2025).

Taux de récupération : Acier/Al/Cu 90%, PGM 95%, REE 10% (actuel) → 50% (objectif 2035), Plastiques 30%.

Facteurs d'émission : IAI (Al : 9,0 tCO₂/t), World Steel (Fe : 1,65 tCO₂/t), ICA (Cu : 3,0 tCO₂/t), IPA (PGM : ~25 000 tCO₂/t).

Marché des PGM : Johnson Matthey PGM Market Report (mai 2025), WPIC/CME Group (2025).

Offre de cuivre : S&P Global, « The Future of Copper » (2022).

Réglementation : Parlement européen, accord provisoire ELV Regulation (déc. 2025).

