



Alpine A390 GT Électrique

Profil Carbone Produit

Date d'analyse : 19/08/2026

Émissions : 21691,164 kgCO₂e



1 véhicule Alpine A390 GT, assemblé à Dieppe (France), utilisé pendant 200 000 km sur route mixte, puis fin de vie (démontage + recyclage)

Cette Analyse de Cycle de Vie Carbone a été réalisée par Carbo Produit à l'aide d'une plateforme d'intelligence artificielle générative spécialisée. Le périmètre est strictement limité à l'indicateur carbone (méthode LCIA cutoff by allocation – IPCC 2021 – GWP 100). Nous utilisons notre propre base de données qui agrège plusieurs dizaines de bases de données dont Ademe Base Empreinte et Ecoinvent. Ce rapport inclut des données actualisées à la date de l'analyse.

1. Informations Générales

Organisation (Client) : marketing-hellocarbo-com

Contact : marketing@hellocarbo.com

Adresse : 24 rue de l'Est, 75020 Paris

Description : 1. Identification Modèle : Alpine A390 Électrique — sport fastback, berline à hayon 5 portes, 5 places Versions : A390 GT et A390 GTS Plateforme technique : AmpR Medium, plateforme modulaire de l'Alliance Renault-Nissan-Mitsubishi, partagée avec la Renault Scénic E-Tech Electric et la Nissan Ariya Assemblage final : Manufacture Alpine Dieppe Jean Rédélé (France) Motorisation : 100 % électrique, transmission intégrale 2. Dimensions et volumes Caractéristique Valeur Longueur hors tout 4 615 mm Largeur avec / sans rétroviseurs 2 055 / 1 885 mm Hauteur 1 525 mm Empattement 2 708 mm Porte-à-faux avant / arrière 925 mm / 982 mm Garde au sol (à vide / en charge) 152 / 131 mm Rayon de braquage 11,0 m Coffre sous plage arrière / banquette rabattue 532 L / jusqu'à 1 643 L 3. Masses Caractéristique A390 GT A390 GTS Masse à vide (MVODM) 2 124 kg 2 121 kg Répartition avant / arrière 49 % / 51 % 49 % / 51 % Remorque non freinée / freinée 750 kg / 1 350 kg 750 kg / 1 350 kg 4. Groupe motopropulseur 3 moteurs électriques (1 avant, 2 arrière) [PDF] — moteur avant à rotor bobiné (code 6AM), moteurs arrière à aimants permanents (code 7DL) Site de production des moteurs : usine Alpine/Renault de Cléon (France) Transmission intégrale avec Alpine Active Torque Vectoring Puissance fiscale : 14 CV Caractéristique A390 GT A390 GTS Puissance max. (av./ar.) 400 ch – 295 kW (98,3 kW / 2x98,3 kW) 470 ch – 345 kW (115 kW / 2x115 kW) Couple max. (av./ar.) 661 Nm (239 / 2x211 Nm) 824 Nm (300 / 2x262 Nm) 5. Batterie et recharge Capacité utile : 89 kWh, technologie lithium-ion NMC, garantie 8 ans / 160 000 km Cellules de batterie : produites par Verkor (usine de Dunkerque, France) Assemblage du pack batterie : site ElectriCity de Douai (France) Charge AC maxi : 11 kW (option 22 kW), bidirectionnelle ; fonctions V2G et V2L Charge DC maxi : 150 kW (GT) / 190 kW (GTS) Temps de charge 20-80 % : wallbox domestique 7,4 kW / 11 kW triphasé ; borne publique 22 kW AC ; supercharger 200 kW DC en 15-20 min selon version 6. Performances et consommation (WLTP) Caractéristique A390 GT A390 GTS Vitesse maximale 200 km/h 220 km/h 0 à 100 km/h 4,8 s 3,9 s 0 à 400 m 13,1 s 12,2 s 0 à 1 000 m 24,1 s 22,6 s Consommation cycle mixte 18,7 – 20,7 kWh/100 km selon modèle/options idem Autonomie WLTP 557 – 503 km selon modèle/options idem

Émissions CO2 cycle mixte 0 g/km 0 g/km 7. Châssis, freinage, pneumatiques
Châssis sport Alpine avec butées hydrauliques de suspension Freins avant : étriers fixes 6 pistons, disques ventilés 365x36 mm ; freins arrière : étriers flottants mono-piston, disques ventilés 350x20 mm Pneus Michelin sur mesure siglés « A39 » : Pilot Sport 4S (jantes 21"), Sport EV (jantes 20"), CrossClimate 3 Sport (jantes 20", en option) Jantes : 20" Cristal ou 21" Snowflake forgées, plusieurs finitions 8. Matériaux et équipements intérieurs Structure : usage important d'aluminium et de matériaux composites, contribuant à limiter la masse à vide sous les 2 130 kg malgré la batterie de 89 kWh (aucune quantité ni proportion précise disponible) Sièges sport Alpine par Sabelt® : cuir nappa biton ou alcantara® perforé ; coque arrière en carbone forgé/sergé en option Ciel de toit tissu (GT) ou alcantara® (GTS) ; pièces décoratives carbone en option Système audio Devialet® haute-fidélité, 13 haut-parleurs (mode « Space » en option) 9. Sécurité 32 systèmes ADAS avancés (régulateur intelligent, freinage d'urgence, caméra 360°, assistance active à la conduite en option, etc.) 6 ou 7 airbags selon la configuration des sièges 10. Teintes disponibles Noir Profond, Bleu Abysses, Bleu Alpine Vision, Argent Mercure, Blanc Topaze, Gris Tonnerre Mat (offre atelier) 11. Connectivité Alpine Portal 12" avec Google™ intégré ; 5 ans de connectivité internet incluant 2 Go/mois Apple CarPlay® / Android Auto™ ; application Alpine Telematics (coaching, données de conduite, mode Track) 12. Reconnaissance environnementale et fiscalité Éco-score : l'A390 GTS a obtenu la qualification eco-score suite à l'arrêté du 15 juillet 2026, un dispositif qui évalue l'empreinte carbone complète du véhicule ainsi que la géographie de sa production (assemblage France, batterie France, moteurs France) Malus écologique 2025 : exonération totale du malus CO2 et du malus au poids pour les versions électriques du fait de l'absence d'émissions de CO2 à l'usage

2. Cadre d'analyse

Définition

1 véhicule Alpine A390 GT, assemblé à Dieppe (France), utilisé pendant 200 000 km sur route mixte, puis fin de vie (démontage + recyclage)

Justification : Le véhicule est un bien durable dont l'impact environnemental dépend de la distance parcourue. L'unité fonctionnelle couvre l'intégralité du cycle de vie : extraction des matières premières, fabrication des composants (cellules, pack, moteurs, carrosserie), assemblage final, distribution, 200 000 km d'utilisation avec remplacements de pièces d'usure, et fin de vie. Le choix de 200 000 km correspond à une durée de vie réaliste pour un véhicule électrique premium (garantie batterie 8 ans/160 000 km, durée de vie mécanique supérieure). Pour obtenir l'impact par km, diviser tous les résultats par 200 000.

Périmètres d'analyse inclus

Extraction et raffinage des matières premières (aluminium, acier, cuivre, NMC, graphite, NdFeB, etc.)

Fabrication des cellules de batterie (Verkor, Dunkerque)

Assemblage du pack batterie (Douai)

Fabrication des moteurs électriques (Cléon)

Fabrication de la carrosserie et assemblage du véhicule (Dieppe)

Transport amont des matières premières vers les sites de fabrication

Transport inter-sites (Dunkerque → Douai → Dieppe, Cléon → Dieppe)

Périmètres d'analyse exclus

Infrastructure routière et usines (capital goods)

Transport du personnel vers les sites de fabrication

Publicité et marketing

Développement du produit (R&D)

Assurance et services financiers

Périmètres d'analyse inclus

Distribution du véhicule fini vers les concessions

Phase d'usage : recharge électrique sur 200 000 km

Phase d'usage : remplacement des pneus, plaquettes, disques, fluides, batterie 12V, filtres

Phase d'usage : maintenance atelier (énergie outils)

Transport des pièces de rechange vers centres de service

Fin de vie : démontage, recyclage des matériaux, traitement des déchets

Périmètres d'analyse exclus

Périmètre géographique : France pour la fabrication (Dieppe, Cléon, Dunkerque, Douai). Utilisation et fin de vie principalement en France (60 % des ventes) et Europe (30 %), avec 10 % international. Mix électrique français pour la charge (60 % du parc), mix européen moyen (30 %), mix international (10 %).

Justification : Le périmètre couvre le cradle-to-grave complet. Les sites de fabrication sont tous en France (information utilisateur), ce qui simplifie la modélisation amont. La distribution aval est modélisée selon 3 zones de marché (France/Europe/international) avec les scénarios PEF par défaut faute de données précises. La phase d'usage inclut l'énergie de charge (perte de ~10 % entre réseau et batterie), les pièces de remplacement (pneus, freins, fluides) et la maintenance. La fin de vie couvre le démontage, le recyclage des matériaux et le traitement des déchets. Sont exclus : infrastructures (routes, usines), biens d'équipement, transport du personnel.

3. Matériaux

Description : Le véhicule pèse 2 124 kg (masse à vide MVODM, source utilisateur). Aucune nomenclature matérielle détaillée (BOM) n'étant fournie, la décomposition est estimée à partir de la masse totale, de la capacité de batterie (89 kWh NMC), du nombre de moteurs (3), et de compositions types de véhicules électriques premium aluminium-intensifs. La batterie NMC de 89 kWh est estimée à 539 kg (densité énergétique pack ~165 Wh/kg, cohérente avec l'état de l'art NMC 811). Les cellules (318 kg) sont décomposées en cathode NMC (25 %), graphite (18 %), électrolyte (13 %), cuivre (12 %), aluminium (5 %), séparateur (3 %), liant+carbone (5 %), boîtier (8 %), autres polymères (9 %). Le pack (221 kg) comprend structure acier+aluminium, busbars cuivre, BMS, cooling et plastiques. Les 3 moteurs (~130 kg) sont décomposés en acier électrique (laminations), cuivre (bobinages), NdFeB (aimants permanents arrière), aluminium (carter) et acier (arbre). La carrosserie aluminium-intensive (~430 kg) reflète l'usage important d'aluminium et de composites (CFRP/GFRP) mentionné par l'utilisateur. L'incertitude globale sur les poids estimés est de ±20 % (estimation volumétrique/massique à partir de données types EV).

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Batterie - Cellules	NMC 811 (matériau actif cathodique)	80.000	Carbo / ±20%
Batterie - Cellules	Graphite (anode)	57.000	Carbo / ±20%
Batterie - Cellules	Électrolyte (LiPF6 + carbonates organiques)	41.000	Carbo / ±20%
Batterie - Cellules	Cuivre (foil + tabs)	42.000	Carbo / ±20%
Batterie - Cellules	Aluminium (foil + boîtier + tabs)	43.000	Carbo / ±20%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Batterie - Cellules	Séparateur (polyéthylène/polypropylène)	10.000	Carbo / ±20%
Batterie - Cellules	Liant PVDF + noir de carbone	16.000	Carbo / ±25%
Batterie - Cellules	Autres polymères (ruban, colle, packaging cellule)	29.000	Carbo / ±30%
Batterie - Pack	Acier (structure module + fixations)	66.000	Carbo / ±25%
Batterie - Pack	Aluminium (structure + boîtier + refroidissement)	90.000	Carbo / ±25%
Batterie - Pack	Cuivre (busbars + câblage)	35.000	Carbo / ±25%
Batterie - Pack	Coolant (éthylène glycol + eau)	10.000	Carbo / ±30%
Batterie - Pack	BMS (cartes PCB + composants électroniques)	10.000	Carbo / ±30%
Batterie - Pack	Plastiques (connecteurs, supports, gaine)	10.000	Carbo / ±30%
Carrosserie/Structure	Aluminium (tôle, profilés, moulages)	290.000	Carbo / ±20%
Carrosserie/Structure	Acier (renforts, éléments structuraux)	80.000	Carbo / ±25%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Carrosserie/Structure	Composite CFRP (fibre de carbone + résine époxy)	35.000	Carbo / ±30%
Carrosserie/Structure	Composite GFRP (fibre de verre + résine)	25.000	Carbo / ±30%
Extérieur	Aluminium (portières, capot, hayon)	70.000	Carbo / ±25%
Extérieur	Plastique (pare-chocs, garnitures, rétroviseurs)	25.000	Carbo / ±25%
Extérieur	Caoutchouc (joints, weatherstripping)	15.000	Carbo / ±25%
Vitrage	Verre (pare-brise, vitres latérales, lunette)	45.000	Carbo / ±15%
Moteurs électriques	Acier électrique (laminations stator/rotor)	50.000	Carbo / ±20%
Moteurs électriques	Cuivre (bobinages)	35.000	Carbo / ±20%
Moteurs électriques	Aimants permanents NdFeB (moteurs arrière)	15.000	Carbo / ±30%
Moteurs électriques	Aluminium (carter, dissipateurs)	20.000	Carbo / ±20%
Moteurs électriques	Acier (arbre, roulements, composants mécaniques)	10.000	Carbo / ±25%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Électronique de puissance	Aluminium (boîtier + refroidissement)	18.000	Carbo / ±25%
Électronique de puissance	Cuivre (connexions, busbars)	8.000	Carbo / ±25%
Électronique de puissance	Acier (fixations, éléments mécaniques)	5.000	Carbo / ±30%
Électronique de puissance	Silicium (IGBT/SiC) + cartes PCB	9.000	Carbo / ±30%
Électronique de puissance	Plastiques (connecteurs, isolants)	5.000	Carbo / ±30%
Intérieur - Sièges	Acier (châssis siège)	40.000	Carbo / ±20%
Intérieur - Sièges	Mousse polyuréthane	25.000	Carbo / ±20%
Intérieur - Sièges	Cuir nappa	15.000	Carbo / ±25%
Intérieur - Sièges	Alcantara (polyester microfibre)	5.000	Carbo / ±30%
Intérieur - Sièges	CFRP (coques arrière sport)	15.000	Carbo / ±30%
Intérieur - Sièges	Plastiques (réglages, garnitures)	20.000	Carbo / ±25%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Intérieur - Habitacle	Plastiques (ABS, PP - tableau de bord, consoles)	20.000	Carbo / ±25%
Intérieur - Habitacle	Aluminium (inserts décoratifs)	10.000	Carbo / ±30%
Intérieur - Habitacle	CFRP (inserts décoratifs carbone - option)	5.000	Carbo / ±30%
Intérieur - Habitacle	Autres (verre, électronique, caoutchouc)	5.000	Carbo / ±40%
Intérieur - Toit	Tissu/Alcantara (ciel de toit)	5.000	Carbo / ±30%
Intérieur - Toit	Mousse polyuréthane (support ciel de toit)	5.000	Carbo / ±30%
Intérieur - Moquette	PET/nylon (moquette + garnitures sol)	20.000	Carbo / ±25%
Intérieur - Moquette	Mousse polyuréthane (support moquette)	10.000	Carbo / ±25%
Châssis/Suspension	Acier (bras, sous-châssis, ressorts)	170.000	Carbo / ±20%
Châssis/Suspension	Aluminium (bras de suspension, éléments)	60.000	Carbo / ±25%
Châssis/Suspension	Fonte (éléments moulés)	40.000	Carbo / ±25%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Freins	Fonte (disques ventilés)	38.000	Carbo / ±15%
Freins	Aluminium (étriers)	12.000	Carbo / ±20%
Freins	Acier (plaquettes, garnissages, fixations)	5.000	Carbo / ±25%
Jantes	Aluminium forgé (4 jantes 20-21 pouces)	55.000	Carbo / ±15%
Pneus	Caoutchouc (mélange SBR/BR)	45.000	Carbo / ±15%
Pneus	Acier (tringle, ceintures)	12.000	Carbo / ±15%
Pneus	Textile (nappe carcasse)	8.000	Carbo / ±20%
Câblage	Cuivre (faisceau haute + basse tension)	35.000	Carbo / ±20%
Câblage	Plastique (isolation PVC/PE)	20.000	Carbo / ±20%
Câblage	Connecteurs (plastique + cuivre)	5.000	Carbo / ±25%
Infodivertissement	Aluminium (boîtiers, dissipateurs)	8.000	Carbo / ±25%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Infodivertissement	Acier (fixations, châssis écran)	5.000	Carbo / ±30%
Infodivertissement	PCB + composants électroniques (Devialet, écran)	8.000	Carbo / ±30%
Infodivertissement	Verre (écran tactile 12")	5.000	Carbo / ±20%
Infodivertissement	Plastiques (coques haut-parleurs, garnitures)	4.000	Carbo / ±30%
Peinture	Peintures (apprêt, base, vernis - époxy/acrylique/polyuréthane)	15.000	Carbo / ±25%
Fluides	Coolant (éthylène glycol + eau - circuit thermique)	15.000	Carbo / ±30%
Fluides	Liquide de frein (DOT 4)	1.000	Carbo / ±30%
Fluides	Autres fluides (huile transmission, réfrigérant, lave-glace)	9.000	Carbo / ±30%
Divers	Plastiques (éléments non classés ailleurs)	20.000	Carbo / ±40%
Divers	Caoutchouc (joints, silentblocs, éléments divers)	10.000	Carbo / ±40%
Divers	Autres matériaux (verre, céramique, électronique, adhésifs)	20.000	Carbo / ±40%

Poids total : 2124.000 kg

Détails des hypothèses

Batterie – Cellules

Cathode NMC 811 = 25 % de la masse cellule. Cellules estimées à 318 kg ($89\,000\text{ Wh} \div 280\text{ Wh/kg}$ densité cellulaire NMC 811 état de l'art). $318 \times 0,25 = 80\text{ kg}$. Source précurseur supposée Corée (fournisseur majeur NMC), transport modélisé au §4.

Batterie – Cellules

Anode graphite = 18 % de la masse cellule. $318 \times 0,18 = 57\text{ kg}$. Graphite naturel majoritairement importé de Chine (80 % marché mondial), transport spécifique modélisé au §4.

Batterie – Cellules

Électrolyte = 13 % de la masse cellule. $318 \times 0,13 = 41\text{ kg}$. Composé de LiPF6 dissous dans un mélange de carbonates organiques (EC, EMC, DMC).

Batterie – Cellules

Cuivre = 12 % de la masse cellule (collecteur cathode + tabs). $318 \times 0,12 = 38\text{ kg}$ arrondi à 42 kg en incluant les tabs cuivre (4 kg). Foil d'épaisseur $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$. Origine Europe supposée.

Batterie – Cellules

Aluminium = 5 % foil + 8 % boîtier + 2 % tabs = 15 % de la masse cellule. $318 \times 0,15 = 48\text{ kg}$ arrondi à 43 kg (ajustement pour cohérence avec total cellule). L'aluminium du foil est en feuille mince $\sim 15\text{ }\mu\text{m}$, le boîtier en feuille plus épaisse.

Batterie – Cellules

Séparateur = 3 % de la masse cellule. $318 \times 0,03 = 10\text{ kg}$. Film microporeux PE/PP entre cathode et anode.

Batterie – Cellules

Liant PVDF (polyfluorure de vinylidène) + noir de carbone conducteur = 5 % de la masse cellule. $318 \times 0,05 = 16$ kg. Le PVDF est utilisé comme liant pour la cathode, le noir de carbone comme additif conducteur.

Batterie – Cellules

Polymères divers = 9 % de la masse cellule. $318 \times 0,09 = 29$ kg. Comprend ruban adhésif (PET), colles structurales, et packaging de protection cellule.

Batterie – Pack

Structure métallique du pack = 66 kg. Estimée à partir du poids total pack (221 kg) et de la proportion typique de structure acier (~30 %). Comprend châssis module, fixations et brides.

Batterie – Pack

Aluminium du pack = 90 kg. Comprend boîtier extérieur (~30 kg), structure module aluminium (~40 kg) et plaques/tubes de refroidissement (~20 kg). Estimé à ~41 % du poids pack non-cellulaire.

Batterie – Pack

Busbars cuivre = 35 kg. Connexions à barres omnibus entre modules, câblage haute tension intra-pack. Estimé à ~16 % du poids pack non-cellulaire.

Batterie – Pack

Liquide de refroidissement = 10 kg. Mélange eau + éthylène glycol (~50/50) pour le circuit thermique du pack, volume estimé à ~10 L.

Batterie – Pack

Battery Management System = 10 kg. Comprend cartes PCB, capteurs de tension/température, microcontrôleurs et électronique de gestion du pack.

Batterie – Pack

Composants plastiques du pack = 10 kg. Comprend connecteurs en plastique, supports de modules, gaines de câblage et éléments d'isolation.

Carrosserie/Structure

Aluminium = 290 kg. Véhicule aluminium-intensif (information utilisateur). Estimé à ~67 % de la masse carrosserie (430 kg). Comprend tôle pour panneaux, profilés extrudés pour structure, et pièces moulées pour points de fixation.

Carrosserie/Structure

Acier = 80 kg. Renforts de sécurité (pieds avant/arrière, longerons) en acier à très haute résistance pour la protection d'habitacle. Estimé à ~19 % de la masse carrosserie.

Carrosserie/Structure

CFRP = 35 kg. Matériaux composites carbone mentionnés par l'utilisateur. Utilisé pour éléments structuraux légers (plancher, tunnel, éléments de liaison). Estimé à ~8 % de la masse carrosserie.

Carrosserie/Structure

GFRP = 25 kg. Composites verre utilisés pour éléments secondaires (panneaux sous-plancher, éléments de protection). Estimé à ~6 % de la masse carrosserie.

Extérieur

Aluminium extérieur = 70 kg. Portières, capot et hayon en aluminium pour économie de poids. Estimé à ~64 % de la masse extérieure (110 kg).

Extérieur

Plastiques extérieurs = 25 kg. Pare-chocs (PP), garnitures, coques de rétroviseurs, bas de caisse. Estimé à ~23 % de la masse extérieure.

Extérieur

Joints d'étanchéité = 15 kg. Joints de portières, de vitres, de capot et de hayon en caoutchouc EPDM. Estimé à ~14 % de la masse extérieure.

Vitrage

Vitrage = 45 kg. Pare-brise feuilleté, vitres latérales et lunette arrière trempées. Surface vitrée estimée à ~3,5 m² pour un fastback 4,6 m, densité verre ~2,5 g/cm³,

épaisseur moyenne ~3,5 mm.

Moteurs électriques

Acier électrique = 50 kg. Laminations magnétiques pour les 3 moteurs (1 avant rotor bobiné + 2 arrière aimants permanents). Estimé à ~38 % de la masse moteurs (130 kg).

Moteurs électriques

Cuivre bobinages = 35 kg. Bobinages stator des 3 moteurs. Estimé à ~27 % de la masse moteurs. Le moteur avant à rotor bobiné nécessite également du cuivre au rotor.

Moteurs électriques

Aimants NdFeB = 15 kg. Les 2 moteurs arrière (code 7DL) utilisent des aimants permanents néodyme-fer-bore. Estimé à ~12 % de la masse moteurs. Origine Chine supposée (95 % de la production mondiale), transport spécifique modélisé au §4.

Moteurs électriques

Aluminium carter = 20 kg. Carters moteur et dissipateurs thermiques pour les 3 moteurs. Estimé à ~15 % de la masse moteurs.

Moteurs électriques

Acier mécanique = 10 kg. Arbres de transmission, roulements, et composants mécaniques internes des 3 moteurs. Estimé à ~8 % de la masse moteurs.

Électronique de puissance

Aluminium = 18 kg. Boîtiers et dissipateurs thermiques des inverters/onboard chargers. Estimé à ~40 % de la masse électronique de puissance (45 kg).

Électronique de puissance

Cuivre = 8 kg. Connexions haute tension, busbars et borniers dans les inverters et chargeurs. Estimé à ~18 % de la masse électronique de puissance.

Électronique de puissance

Acier = 5 kg. Fixations, supports et éléments mécaniques de l'électronique de puissance. Estimé à ~11 % de la masse électronique de puissance.

Électronique de puissance

Semi-conducteurs + PCB = 9 kg. Puces IGBT ou SiC pour les invertis, cartes PCB pour le contrôle. Estimé à ~20 % de la masse électronique de puissance.

Électronique de puissance

Plastiques = 5 kg. Connecteurs, gaines isolantes et éléments de protection. Estimé à ~11 % de la masse électronique de puissance.

Intérieur – Sièges

Acier = 40 kg. Châssis et rails de réglage pour 5 sièges sport Sabelt. Estimé à ~33 % de la masse sièges (120 kg).

Intérieur – Sièges

Mousse PU = 25 kg. Garnissage des assises et dossiers pour 5 sièges. Estimé à ~21 % de la masse sièges.

Intérieur – Sièges

Cuir = 15 kg. Revêtement cuir nappa biton (option sièges). Estimé à ~12 % de la masse sièges.

Intérieur – Sièges

Alcantara = 5 kg. Revêtement Alcantara perforé (option sièges). Estimé à ~4 % de la masse sièges.

Intérieur – Sièges

CFRP = 15 kg. Coques arrière en carbone forgé/sergé (option sièges sport Sabelt). Estimé à ~12 % de la masse sièges.

Intérieur – Sièges

Plastiques = 20 kg. Mécanismes de réglage, garnitures plastiques et supports. Estimé à ~17 % de la masse sièges.

Intérieur – Habitacle

Plastiques habitacle = 20 kg. Tableau de bord, console centrale, garnitures de portes en ABS/PP. Estimé à ~50 % de la masse habitacle (40 kg).

Intérieur – Habitacle

Aluminium habitacle = 10 kg. Inserts décoratifs aluminium (tableau de bord, console, poignées). Estimé à ~25 % de la masse habitacle.

Intérieur – Habitacle

CFRP habitacle = 5 kg. Pièces décoratives carbone (option). Estimé à ~12 % de la masse habitacle.

Intérieur – Habitacle

Autres habitacle = 5 kg. Comprend petits composants électroniques, joints et divers. Estimé à ~13 % de la masse habitacle.

Intérieur – Toit

Ciel de toit = 5 kg. Tissu (GT) ou Alcantara (GTS). Estimé à ~50 % de la masse toit (10 kg).

Intérieur – Toit

Mousse PU toit = 5 kg. Support en mousse pour le ciel de toit. Estimé à ~50 % de la masse toit.

Intérieur – Moquette

Moquette = 20 kg. Moquette en PET/nylon et garnitures de sol. Estimé à ~67 % de la masse moquette (30 kg).

Intérieur – Moquette

Mousse PU moquette = 10 kg. Support en mousse sous la moquette. Estimé à ~33 % de la masse moquette.

Châssis/Suspension

Acier châssis = 170 kg. Bras de suspension, sous-châssis avant/arrière, ressorts helicodynamiques. Estimé à ~63 % de la masse châssis (270 kg).

Châssis/Suspension

Aluminium châssis = 60 kg. Bras de suspension et éléments de châssis en aluminium pour économie de poids. Estimé à ~22 % de la masse châssis.

Châssis/Suspension

Fonte = 40 kg. Éléments moulés (rotules, supports) en fonte. Estimé à ~15 % de la masse châssis.

Freins

Disques = 38 kg. 2 disques avant 365×36 mm + 2 disques arrière 350×20 mm, ventilés. Estimé à ~69 % de la masse freins (55 kg).

Freins

Étriers = 12 kg. Étriers fixes 6 pistons (av) + étriers flottants mono-piston (ar) en aluminium. Estimé à ~22 % de la masse freins.

Freins

Acier freins = 5 kg. Plaquettes (support acier + garnissage), fixations et éléments mécaniques. Estimé à ~9 % de la masse freins.

Jantes

Jantes forgées = 55 kg. 4 jantes Cristal 20" ou Snowflake 21" forgées. Poids unitaire estimé à ~14 kg pour du forgé 20" sportif.

Pneus

Caoutchouc = 45 kg. 4 pneus Michelin Pilot Sport 4S / Sport EV / CrossClimate 3 Sport siglés A39. Estimé à ~69 % de la masse pneus (65 kg).

Pneus

Acier pneus = 12 kg. Tringles et ceintures acier dans les 4 pneus. Estimé à ~18 % de la masse pneus.

Pneus

Textile = 8 kg. Nappes carcasse en textile (nylon, polyester) dans les 4 pneus. Estimé à ~12 % de la masse pneus.

Câblage

Cuivre câblage = 35 kg. Faisceau haute tension (batterie-moteurs) + basse tension (éclairage, électronique). Estimé à ~58 % de la masse câblage (60 kg).

Câblage

Isolation = 20 kg. Gaines d'isolation en PVC et polyéthylène. Estimé à ~33 % de la masse câblage.

Câblage

Connecteurs = 5 kg. Boîtiers de connecteurs en plastique + contacts cuivre. Estimé à ~8 % de la masse câblage.

Infodivertissement

Aluminium info = 8 kg. Boîtiers et dissipateurs des systèmes audio Devialet et écran 12". Estimé à ~27 % de la masse infodivertissement (30 kg).

Infodivertissement

Acier info = 5 kg. Fixations et châssis de l'écran et des haut-parleurs. Estimé à ~17 % de la masse infodivertissement.

Infodivertissement

PCB = 8 kg. 13 haut-parleurs Devialet + écran 12" + modules connectivité. Comprend cartes PCB, composants et bobines des haut-parleurs. Estimé à ~27 % de la masse infodivertissement.

Infodivertissement

Verre écran = 5 kg. Écran tactile Alpine Portal 12" en verre trempé. Estimé à ~17 % de la masse infodivertissement.

Infodivertissement

Plastiques info = 4 kg. Coques de haut-parleurs et garnitures plastiques. Estimé à ~13 % de la masse infodivertissement.

Peinture

Peinture = 15 kg. Couverture complète du véhicule (surface peinte ~12 m², grammage total ~1 250 g/m² pour 3 couches). Comprend apprêt époxy, base colorée et vernis polyuréthane.

Fluides

Coolant = 15 kg. Circuit thermique du pack batterie et des moteurs. Volume estimé à ~15 L de mélange eau/éthylène glycol.

Fluides

Liquide de frein = 1 kg. Volume estimé à ~1 L de liquide DOT 4 pour le circuit de freinage.

Fluides

Autres fluides = 9 kg. Comprend huile de transmission/réducteur (~4 kg), réfrigérant R1234yf climatisation (~1 kg) et lave-glace (~4 kg).

Divers

Plastiques divers = 20 kg. Comprend éléments non attribués ailleurs : clips, attaches, gaines, supports divers en plastique. Estimé à ~40 % de la masse divers (50 kg).

Divers

Caoutchouc divers = 10 kg. Silentblocs, joints divers, éléments antivibration en caoutchouc. Estimé à ~20 % de la masse divers.

Divers

Autres = 20 kg. Comprend petits composants électroniques, adhésifs structuraux, céramiques (capteurs), et matériaux divers non classés. Estimé à ~40 % de la masse divers.

4. Fabrication

Description : La fabrication comprend 4 sites français distincts, chacun modélisé séparément. (1) Verkor (Dunkerque) fabrique les cellules NMC — procédé énergétiquement intense (séchage électrodes, assemblage, formation). (2) Douai assemble le pack batterie à partir des cellules. (3) Cléon fabrique les 3 moteurs électriques. (4) Dieppe réalise la carrosserie, peinture et l'assemblage final du véhicule. Les ratios énergétiques sont estimés à partir de données sectorielles de l'industrie batterie et automobile. Pour les cellules, le ratio de 30 kWh/kWh provient de la littérature ACV (Ellingsen et al., 2018 ; Dai et al., 2019). La nature de la donnée est 'énergie finale, frontière site' (cas 1 de l'arbre de décision) pour les cellules (donnée sectorielle), et 'nature inconnue' (cas 4) pour les autres procédés, avec +20 % d'incertitude ajoutée en propagation quadratique. La ventilation gaz/électricité est estimée : le séchage des électrodes est le poste dominant thermique (gaz), tandis que l'assemblage, la formation et la mécanique sont électriques.

Processus	Énergie	Consommation (kWh)	Source / Incertitude
Fabrication cellules NMC — Séchage électrodes (Verkor, Dunkerque)	Gaz naturel (PCI) — France	1469.000	Carbo / ±40%
Fabrication cellules NMC — Assemblage + formation (Verkor, Dunkerque)	Électricité — France	1201.000	Carbo / ±40%
Assemblage pack batterie — Électricité (Douai)	Électricité — France	356.000	Carbo / ±73%
Assemblage pack batterie — Chauffage (Douai)	Gaz naturel (PCI) — France	89.000	Carbo / ±73%
Fabrication moteurs — Mécanique + bobinage (Cléon)	Électricité — France	728.000	Carbo / ±73%

Processus	Énergie	Consommation (kWh)	Source / Incertitude
Fabrication moteurs — Traitement thermique (Cléon)	Gaz naturel (PCI) — France	312.000	Carbo / ±73%
Assemblage véhicule — Soudage + peinture + montage (Dieppe)	Électricité — France	1746.000	Carbo / ±73%
Assemblage véhicule — Peinture + chauffage (Dieppe)	Gaz naturel (PCI) — France	1164.000	Carbo / ±73%

Consommation totale : 7065.000 kWh

Incertitude totale : ±50% — L'incertitude globale de la fabrication est dominée par les ratios énergétiques estimés (cellules ±40 %, pack/moteurs/assemblage ±73 %). L'incertitude combinée par propagation quadratique sur les 7 065 kWh totaux est d'environ ±50 %. Les vecteurs (gaz vs électricité) et les pays (France) ont plus d'impact que la précision du ratio.

Détails des hypothèses

Fabrication cellules NMC — Séchage électrodes (Verkor, Dunkerque)

Ratio sectoriel : 30 kWh/kWh de capacité (Ellingsen et al., 2018 ; Dai et al., 2019).
Énergie finale, frontière site, cas 1 : reportée telle quelle. Total cellules : $89 \times 30 = 2\,670$ kWh. Part gaz (séchage électrodes = procédé thermique >100°C) : 55 % → $2\,670 \times 0,55 = 1\,469$ kWh. Vecteur par défaut : Gaz naturel (PCI) — France (séchage >100°C).

Fabrication cellules NMC — Assemblage + formation (Verkor, Dunkerque)

Part électricité (assemblage, formation, cyclage) : 45 % → $2\,670 \times 0,45 = 1\,201$ kWh.
Énergie finale, frontière site, cas 1 : reportée telle quelle. Vecteur : Électricité — France.

Assemblage pack batterie — Électricité (Douai)

Ratio estimé : 5 kWh/kWh de capacité. Nature inconnue (cas 4) : reporté tel quel, +20 % d'incertitude en propagation quadratique. Total : $89 \times 5 = 445$ kWh. Part électricité : 80 % $\rightarrow 445 \times 0,80 = 356$ kWh. Vecteur : Électricité — France.

Assemblage pack batterie — Chauffage (Douai)

Part gaz (chauffage bâtiment, postes thermiques) : 20 % $\rightarrow 445 \times 0,20 = 89$ kWh. Nature inconnue (cas 4) : reporté tel quel. Vecteur par défaut : Gaz naturel (PCI) — France (thermique $\leq 100^\circ\text{C}$ intégré $\rightarrow$ électricité par défaut, mais chauffage bâtiment = gaz). Incertitude : $\sqrt{(70^2 + 20^2)} = \pm 73$ %.

Fabrication moteurs — Mécanique + bobinage (Cléon)

Ratio estimé : 8 kWh/kg de moteur. Nature inconnue (cas 4) : reporté tel quel, +20 % d'incertitude. Total : $130 \times 8 = 1\,040$ kWh. Part électricité (découpage, bobinage, usinage) : 70 % $\rightarrow 1\,040 \times 0,70 = 728$ kWh. Vecteur : Électricité — France.

Fabrication moteurs — Traitement thermique (Cléon)

Part gaz (traitement thermique, étuve) : 30 % $\rightarrow 1\,040 \times 0,30 = 312$ kWh. Vecteur par défaut : Gaz naturel (PCI) — France (thermique $>100^\circ\text{C}$). Incertitude : $\sqrt{(70^2 + 20^2)} = \pm 73$ %.

Assemblage véhicule — Soudage + peinture + montage (Dieppe)

Ratio estimé : 2 kWh/kg de glider (véhicule sans batterie ni moteurs). Glider = $2\,124 - 539 - 130 = 1\,455$ kg. Nature inconnue (cas 4) : reporté tel quel, +20 % d'incertitude. Total : $1\,455 \times 2 = 2\,910$ kWh. Part électricité (soudage, robots, éclairage, montage) : 60 % $\rightarrow 2\,910 \times 0,60 = 1\,746$ kWh. Vecteur : Électricité — France.

Assemblage véhicule — Peinture + chauffage (Dieppe)

Part gaz (fours de peinture, étuves séchage, chauffage bâtiment) : 40 % $\rightarrow 2\,910 \times 0,40 = 1\,164$ kWh. Vecteur par défaut : Gaz naturel (PCI) — France (thermique $>100^\circ\text{C}$: fours de peinture). Incertitude : $\sqrt{(70^2 + 20^2)} = \pm 73$ %.

5. Transport

Lieu de fabrication : France — Dieppe (assemblage final), Cléon (moteurs), Dunkerque (cellules Verkor), Douai (pack batterie)

Description : Les 4 sites de fabrication sont explicitement mentionnés par l'utilisateur : Manufacture Alpine Dieppe Jean Rédélé pour l'assemblage final, usine Alpine/Renault de Cléon pour les moteurs, Verkor Dunkerque pour les cellules, et ElectriCity Douai pour le pack batterie. Tous situés en France.

Type de transport	Distance (km)	Incertitude	Explication
Navire porte-conteneurs transocéanique	18000	±40%	Précurseur NMC (Corée → Dunkerque) : Busan → Dunkerque, distance maritime estimée ~18 000 km (route Corée-Europe via Suez). Poids : 80 kg de cathode NMC. Scénario PEF hors Europe : 18 000 km navire.
Camion (>32t, EURO 4)	10	±40%	Port de Dunkerque → usine Verkor (Dunkerque) : ~10 km par camion. Poids : 80 kg de précurseur NMC.
Navire porte-conteneurs transocéanique	18000	±40%	Graphite (Chine → Dunkerque) : Shanghai → Dunkerque, distance maritime ~18 000 km (route Chine-Europe via Suez). Poids : 57 kg de graphite anodique.
Camion (>32t, EURO 4)	10	±40%	Port de Dunkerque → usine Verkor : ~10 km. Poids : 57 kg de graphite.
Navire porte-conteneurs transocéanique	18000	±40%	Aimants NdFeB (Chine → Le Havre) : Shanghai → Le Havre, ~18 000 km. Poids : 15 kg d'aimants NdFeB pour moteurs arrière.
Camion (>32t, EURO 4)	120	±40%	Port du Havre → usine Cléon : ~120 km par camion. Poids : 15 kg d'aimants NdFeB.

Type de transport	Distance (km)	Incertitude	Explication
Camion (>32t, EURO 4)	130	±40%	Autres matières cellules (Europe → Dunkerque) : scénario PEF par défaut fournisseur Europe — 130 km camion. Poids : 181 kg (électrolyte, cuivre, aluminium, séparateur, liant, autres polymères).
Train (fret moyen)	240	±40%	Autres matières cellules (Europe → Dunkerque) : scénario PEF par défaut — 240 km train fret. Poids : 181 kg.
Péniche	270	±40%	Autres matières cellules (Europe → Dunkerque) : scénario PEF par défaut — 270 km péniche. Poids : 181 kg.
Camion (>32t, EURO 4)	130	±40%	Matériaux pack batterie (Europe → Douai) : scénario PEF par défaut fournisseur Europe — 130 km camion. Poids : 221 kg (structure, busbars, BMS, cooling, plastiques).
Train (fret moyen)	240	±40%	Matériaux pack batterie (Europe → Douai) : scénario PEF par défaut — 240 km train. Poids : 221 kg.
Péniche	270	±40%	Matériaux pack batterie (Europe → Douai) : scénario PEF par défaut — 270 km péniche. Poids : 221 kg.
Camion (>32t, EURO 4)	130	±40%	Autres matières moteurs (Europe → Cléon) : scénario PEF par défaut fournisseur Europe — 130 km camion. Poids : 115 kg (acier électrique, cuivre, aluminium, acier).
Train (fret moyen)	240	±40%	Autres matières moteurs (Europe → Cléon) : scénario PEF par défaut — 240 km train. Poids : 115 kg.
Péniche	270	±40%	Autres matières moteurs (Europe → Cléon) : scénario PEF par défaut — 270 km péniche.

Type de transport	Distance (km)	Incertitude	Explication
			Poids : 115 kg.
Camion (>32t, EURO 4)	130	±40%	Matériaux carrosserie/équipements (Europe → Dieppe) : scénario PEF par défaut fournisseur Europe — 130 km camion. Poids : 1 455 kg (carrosserie, extérieur, vitrage, intérieur, châssis, freins, jantes, pneus, câblage, électronique, peinture, fluides, divers).
Train (fret moyen)	240	±40%	Matériaux carrosserie/équipements (Europe → Dieppe) : scénario PEF par défaut — 240 km train. Poids : 1 455 kg.
Péniche	270	±40%	Matériaux carrosserie/équipements (Europe → Dieppe) : scénario PEF par défaut — 270 km péniche. Poids : 1 455 kg.
Camion (>32t, EURO 4)	110	±30%	Cellules batterie (Dunkerque → Douai) : transport inter-site, ~110 km par camion. Poids : 318 kg de cellules.
Camion (>32t, EURO 4)	180	±30%	Pack batterie (Douai → Dieppe) : transport inter-site, ~180 km par camion. Poids : 539 kg de pack complet.
Camion (>32t, EURO 4)	120	±30%	Moteurs (Cléon → Dieppe) : transport inter-site, ~120 km par camion. Poids : 130 kg (3 moteurs assemblés).
Camion (>32t, EURO 4)	1200	±40%	Distribution France (60 % des ventes) : Dieppe → concessions françaises. Scénario PEF chaîne locale — 1 200 km par camion. Poids : $2\,124 \times 0,60 = 1\,274$ kg.
Camion (>32t, EURO 4)	3500	±40%	Distribution Europe (30 % des ventes) : Dieppe → concessions européennes. Scénario PEF chaîne intracontinentale — 3

Type de transport	Distance (km)	Incertitude	Explication
			500 km par camion. Poids : $2\,124 \times 0,30 = 637$ kg.
Camion (>32t, EURO 4)	1000	±40%	Distribution internationale (10 % des ventes) : Dieppe → port + port → destination. Scénario PEF chaîne internationale — 1 000 km camion (aller port + retour intérieur). Poids : $2\,124 \times 0,10 = 212$ kg.
Navire porte-conteneurs transocéanique	18000	±40%	Distribution internationale (10 %) : port européen → destination internationale. Scénario PEF — 18 000 km navire. Poids : 212 kg.

6. Utilisation

Description : La phase d'usage couvre 200 000 km de conduite sur route mixte. L'énergie de recharge est calculée à partir de la consommation WLTP (19,7 kWh/100 km, moyenne de la plage 18,7-20,7 donnée par l'utilisateur) en tenant compte des pertes de charge (~10 %). Le véhicule est vendu à 60 % en France (mix électrique français, majoritairement nucléaire) et 40 % hors France (mix européen moyen). Les pièces d'usure remplacées sont : 4 jeux de pneus (durée de vie ~40 000 km pour pneus sport), 2 jeux de plaquettes de frein (régénération → durée de vie allongée), 1 jeu de disques, 3 vidanges de coolant, 1 batterie 12V, lave-glace annuel, essuie-glaces, filtres habitacle et divers. La maintenance atelier (énergie outils) est négligeable mais incluse. Le transport des pièces de rechange vers les centres de service est modélisé (1 trajet groupé de 500 kg sur 200 km).

Activité	Consommation (kWh)	Incertitude
Recharge véhicule — France (60 % du parc, mix électrique français)	26280.000	±15%
Recharge véhicule — Hors France (40 % du parc, mix électrique européen moyen)	17520.000	±20%
Maintenance atelier — énergie outils (sur 200 000 km)	22.000	±70%

Détails des hypothèses

Calcul détaillé – Recharge véhicule — France (60 % du parc, mix électrique français)

Consommation WLTP : 19,7 kWh/100 km (moyenne de 18,7-20,7). Énergie batterie sur 200 000 km : $200\,000 \times 19,7/100 = 39\,400$ kWh. Rendement de charge ~90 % (prédominance AC) → énergie réseau = $39\,400 / 0,90 = 43\,778$ kWh. Part France (60 %) : $43\,778 \times 0,60 = 26\,280$ kWh. Énergie finale au compteur (cas 1) : reportée telle quelle, aucun rendement à appliquer.

Calcul détaillé – Recharge véhicule — Hors France (40 % du parc, mix électrique européen moyen)

Part hors France (40 %) : $43\,778 \times 0,40 = 17\,520$ kWh. Énergie finale au compteur (cas 1) : reportée telle quelle. Mix électrique européen moyen (inclut charbon, gaz, nucléaire, renouvelables selon pays).

Calcul détaillé – Maintenance atelier — énergie outils (sur 200 000 km)

Estimation : $4 \text{ montages pneus} \times 2 \text{ kWh} + 2 \text{ services freins} \times 1 \text{ kWh} + 12 \text{ services généraux} \times 1 \text{ kWh} = 8 + 2 + 12 = 22$ kWh. Énergie finale au compteur (cas 1).

Négligeable mais incluse pour exhaustivité.

Pièces de Rechange

Composant	Matériau	Poids (kg)	Fréquence
Pneus (4 jeux de remplacement)	Caoutchouc SBR/BR	180.000	Tous les 40 000 km (4 remplacements sur 200 000 km)
Pneus (4 jeux de remplacement) - Acier	Acier (tringles + ceintures)	48.000	Tous les 40 000 km (4 remplacements)
Pneus (4 jeux de remplacement) - Textile	Textile (nylon, polyester)	32.000	Tous les 40 000 km (4 remplacements)
Plaquettes de frein (2 remplacements)	Acier + matériau de friction	10.000	Tous les 100 000 km (2 remplacements)
Disques de frein (1 remplacement)	Fonte (disques ventilés)	38.000	1 remplacement à 150 000 km
Liquide de refroidissement (3 vidanges)	Éthylène glycol + eau	45.000	Tous les 4 ans (3 vidanges)

Composant	Matériau	Poids (kg)	Fréquence
Batterie 12V (1 remplacement)	Plomb-acide (Pb + H ₂ SO ₄ + plastique)	15.000	1 remplacement à ~10 ans
Lave-glace (remplissage annuel)	Eau + additifs tensioactifs	60.000	Annuel (~12-15 remplissages)
Essuie-glaces (6 remplacements)	Caoutchouc + acier	4.000	Tous les 2 ans (6 remplacements)
Filtre habitacle (12 remplacements)	Papier + charbon actif	6.000	Annuel (12 remplacements)
Divers maintenance (huile, graisse, filtres divers)	Divers (huiles, graisses, filtres)	10.000	Réparti sur 200 000 km

Justification – Pneus (4 jeux de remplacement)

Pneus sport Michelin Pilot Sport 4S, durée de vie estimée ~40 000 km. Sur 200 000 km : 5 jeux au total, 1er inclus dans le véhicule → 4 remplacements. Caoutchouc = 69 % de 65 kg × 4 = 180 kg.

Justification – Pneus (4 jeux de remplacement) – Acier

Part acier dans les pneus = 18 %. 65 kg × 18 % × 4 = 47 kg arrondi à 48 kg.

Justification – Pneus (4 jeux de remplacement) – Textile

Part textile dans les pneus = 12 %. 65 kg × 12 % × 4 = 31 kg arrondi à 32 kg.

Justification – Plaquettes de frein (2 remplacements)

Freinage régénératif sur EV → durée de vie allongée à ~100 000 km. Sur 200 000 km : 2 remplacements. Jeu de 4 plaquettes ~5 kg × 2 = 10 kg.

Justification – Disques de frein (1 remplacement)

Disques remplacés à ~150 000 km (freinage régénératif préserve les disques). 1 remplacement de 4 disques = 38 kg.

Justification – Liquide de refroidissement (3 vidanges)

Vidange tous les 4 ans (~50 000 km). Sur 200 000 km : ~3 vidanges. $15 \text{ kg} \times 3 = 45 \text{ kg}$.

Justification – Batterie 12V (1 remplacement)

Batterie auxiliaire 12V remplacée une fois sur la durée de vie. ~15 kg (batterie plomb-acide standard).

Justification – Lave-glace (remplissage annuel)

Remplissage annuel ~5 L. Sur ~12-15 ans : 60 kg.

Justification – Essuie-glaces (6 remplacements)

Remplacement tous les 2 ans. Sur ~12-15 ans : 6 paires $\times \sim 0,6 \text{ kg} = 4 \text{ kg}$.

Justification – Filtre habitacle (12 remplacements)

Remplacement annuel. Sur ~12-15 ans : 12 filtres $\times \sim 0,5 \text{ kg} = 6 \text{ kg}$.

Justification – Divers maintenance (huile, graisse, filtres divers)

Huile de transmission, graisses, filtres divers sur la durée de vie. Estimé à 10 kg.

7. Fin de vie

Description : Scénario de fin de vie standard pour un véhicule électrique en Europe : démontage en centre VHU (Véhicule Hors d'Usage), récupération des fluides, démontage de la batterie, broyage de la carcasse, tri des matériaux. Les taux de recyclage sont basés sur la réglementation européenne (directive VHU 2000/53/CE, réglementation batterie 2023/1542) et les pratiques industrielles actuelles.

Matériau	Taux de recyclage	Source / Incertitude
Acier (tous composants confondus)	90% recyclage / 10% enfouissement	interne / ±10%
Aluminium (tous composants confondus)	85% recyclage / 15% enfouissement	interne / ±10%
Cuivre (tous composants confondus)	85% recyclage / 15% enfouissement	interne / ±10%
Fonte (disques freins + châssis)	90% recyclage / 10% enfouissement	interne / ±10%
NMC 811 (cathode batterie)	50% recyclage / 30% valorisation énergétique / 20% enfouissement	interne / ±20%
Graphite (anode batterie)	50% recyclage / 30% valorisation énergétique / 20% enfouissement	interne / ±25%
Électrolyte batterie (LiPF6 + carbonates)	10% recyclage / 40% valorisation énergétique / 50% traitement physico-chimique	interne / ±30%
Aimants NdFeB (moteurs arrière)	5% recyclage / 95% enfouissement	interne / ±30%

Matériau	Taux de recyclage	Source / Incertitude
CFRP (carrosserie + sièges + habitacle)	10% recyclage / 30% valorisation énergétique / 60% enfouissement	interne / ±30%
GFRP (carrosserie)	15% recyclage / 35% valorisation énergétique / 50% enfouissement	interne / ±30%
Plastiques (tous composants confondus)	25% recyclage / 50% valorisation énergétique / 25% enfouissement	interne / ±20%
Verre (vitrage + écran)	70% recyclage / 20% enfouissement / 10% valorisation énergétique	interne / ±15%
Caoutchouc (joints + pneus originaux + pneus remplacement)	40% recyclage / 40% valorisation énergétique / 20% enfouissement	interne / ±20%
Électronique/PCB (BMS + infodivertissement + puissance)	40% recyclage / 40% valorisation énergétique / 20% enfouissement	interne / ±25%
Fluides (coolant + frein + divers)	90% récupération / 10% traitement physico-chimique	interne / ±15%
Cuir + Alcantara + textiles (sièges + habitacle + toit)	10% recyclage / 40% valorisation énergétique / 50% enfouissement	interne / ±30%
Peinture (sur carrosserie)	0% recyclage / 50% valorisation énergétique / 50% enfouissement (avec métaux)	interne / ±30%
Pneus de remplacement (4 jeux)	40% recyclage / 40% valorisation énergétique / 20% enfouissement	interne / ±20%
Autres pièces de remplacement (freins, fluides, batterie 12V, filtres)	50% recyclage / 30% valorisation énergétique / 20% enfouissement	interne / ±25%

Détails des hypothèses

Acier (tous composants confondus)

Directive VHU 2000/53/CE : taux de récupération/recyclage de l'acier >90 % en Europe. Filières matures de broyage et tri magnétique.

Aluminium (tous composants confondus)

Filière aluminium mature en Europe. Taux de recyclage ~85 % pour l'aluminium automobile (tri par courant de Foucault après broyage).

Cuivre (tous composants confondus)

Filière cuivre mature. Taux de recyclage ~85 % pour le cuivre automobile (récupération par tri électromagnétique après broyage).

Fonte (disques freins + châssis)

Filière fonte similaire à l'acier. Taux de recyclage ~90 % (tri magnétique après broyage).

NMC 811 (cathode batterie)

Réglementation UE batterie 2023/1542 : taux de récupération des matériaux actifs de cathode ≥ 50 % (objectif 65 % en 2025, 70 % en 2030). Filières hydrométallurgiques en développement.

Graphite (anode batterie)

Récupération du graphite en filières hydrométallurgiques. Taux estimé ~50 % (même objectif que cathode).

Électrolyte batterie (LiPF₆ + carbonates)

Traitement chimique spécifique. Récupération du lithium en développement. Le reste est traité comme déchet dangereux.

Aimants NdFeB (moteurs arrière)

Taux de recyclage des aimants NdFeB très faible (~5 %) malgré la criticité des terres rares. Filières de recyclage en développement (HyProMag, Cyclic Materials).

CFRP (carrosserie + sièges + habitacle)

Le recyclage des composites carbone est techniquement difficile. Taux actuel ~10 % (recyclage thermique ou chimique en développement).

GFRP (carrosserie)

Le recyclage des composites verre est limité. Taux actuel ~15 % (broyage et réutilisation en charge).

Plastiques (tous composants confondus)

Taux de recyclage des plastiques automobiles ~25 % en moyenne (varie selon le type : PP, ABS, PVC, PE). Le reste est valorisé énergétiquement ou enfoui.

Verre (vitrage + écran)

Filière verre automobile mature. Taux de recyclage ~70 % (broyage et réutilisation dans la production de verre ou comme charge).

Caoutchouc (joints + pneus originaux + pneus remplacement)

Pneus : filière de recyclage ~40 % (broyage pour surfaces de jeu, revêtements). Le reste est valorisé énergétiquement (cimenteries) ou enfoui.

Électronique/PCB (BMS + infodivertissement + puissance)

Directive DEEE 2012/19/UE : taux de récupération des équipements électroniques ~40 %. Comprend démontage sélectif des composants à haute valeur.

Fluides (coolant + frein + divers)

Récupération des fluides obligatoire en centre VHU. Taux de récupération ~90 % (recyclage ou traitement spécifique).

Cuir + Alcantara + textiles (sièges + habitacle + toit)

Taux de recyclage des textiles et cuirs automobiles ~10 %. Le reste est valorisé énergétiquement ou enfoui.

Peinture (sur carrosserie)

La peinture est solidaire de la tôle lors du broyage. Pas de recyclage spécifique, valorisation énergétique avec les métaux.

Pneus de remplacement (4 jeux)

Même taux que les pneus originaux : ~40 % recyclage (broyage), 40 % valorisation énergétique, 20 % enfouissement.

Autres pièces de remplacement (freins, fluides, batterie 12V, filtres)

Mix de matériaux (fonte, acier, plomb, papier, fluides). Taux de recyclage moyen ~50 % (fonte et acier recyclés, plomb batterie recyclé, fluides récupérés).

8. Équations de Calcul et Incertitudes

Équation Générale

Formule Principale

$$CF_total = CF_materials + CF_manufacturing + CF_distribution + CF_use + CF_EOL$$

Explication : L'empreinte carbone totale du véhicule sur son cycle de vie (cradle-to-grave) est la somme des empreintes de chaque phase : fabrication des matériaux, fabrication des composants et assemblage, distribution (transport amont + aval), utilisation (recharge + pièces de remplacement + maintenance), et fin de vie (recyclage + traitement des déchets). Pour obtenir l'empreinte par km, diviser le total par 200 000.

Équation Détaillée

$$CF_total = \sum_i (m_i \times EF_material_i) + \sum_j (E_j \times EF_energy_j) + \sum_k (W_k \times D_k \times EF_transport_k) + [26280 \times EF_elec_FR + 17520 \times EF_elec_EU + 22 \times EF_elec_FR] + \sum_l (r_l \times EF_material_l) + 22 \times EF_elec_FR + 500 \times 200 \times EF_truck + \sum_p (w_p \times EF_waste_p)$$

Variables

- **m_i** : Masse du matériau i dans le véhicule (kg) – 71 entrées matériaux, total 2 124 kg
- **$EF_material_i$** : Facteur d'émission du matériau i (kgCO₂eq/kg) – inclut extraction et raffinage, non calculé ici (variable symbolique)
- **E_j** : Consommation énergétique du procédé de fabrication j (kWh) – 8 entrées, total 7 065 kWh
- **EF_energy_j** : Facteur d'émission du vecteur énergétique j (kgCO₂eq/kWh) – électricité France ou gaz naturel, non calculé ici

- **W_k** : Poids transporté sur le tronçon k (kg)
- **D_k** : Distance du tronçon de transport k (km)
- **EF_transport_k** : Facteur d'émission du mode de transport k (kgCO₂eq/t.km) – non calculé ici
- **E_charge_n** : Énergie de recharge pour le marché n (kWh) – France 26 280 kWh, Europe 17 520 kWh
- **EF_elec_n** : Facteur d'émission du mix électrique n (kgCO₂eq/kWh) – non calculé ici
- **r_l** : Masse de la pièce de remplacement l (kg) – total 448 kg sur 200 000 km
- **E_maint_m** : Énergie de maintenance atelier m (kWh) – total 22 kWh
- **w_p** : Masse du flux de déchet p en fin de vie (kg)
- **EF_waste_treatment_p** : Facteur d'émission du traitement de déchet p (kgCO₂eq/kg) – non calculé ici

Incertitudes

Niveau d'incertitude global

±35%

Explication : L'incertitude globale est dominée par : (1) l'estimation de la BOM (±20 % sur les poids matériaux), (2) les ratios énergétiques de fabrication (±40-73 % selon les procédés), (3) les scénarios de transport PEF par défaut (±40 %), (4) la consommation WLTP vs réelle (±10-15 %). La propagation quadratique de ces incertitudes donne une incertitude globale d'environ ±35 % sur l'empreinte totale. Les facteurs d'émission (non calculés ici) ajoutent une incertitude supplémentaire dépendant de la base de données utilisée.

Incertitudes par phase

Phase	Incertitude
Matériaux	±20%

Phase	Incertitude
Fabrication	±50%
Distribution	±40%
Utilisation	±20%
Fin de vie	±25%

Facteurs d'incertitude principaux

Les principaux facteurs d'incertitude sont : (1) la décomposition matérielle estimée (BOM non fournie par Alpine, $\pm 20\%$), (2) les ratios énergétiques de fabrication des cellules ($\pm 40\%$), moteurs ($\pm 73\%$) et assemblage ($\pm 73\%$), (3) les distances de transport amont (scénarios PEF par défaut, $\pm 40\%$), (4) la durée de vie des pneus sport ($\pm 30\%$), (5) les taux de recyclage en fin de vie ($\pm 20-30\%$). L'incertitude est plus forte sur la fabrication que sur l'usage, car la consommation WLTP est une donnée utilisateur fiable.

Comment améliorer la précision

Pour un inventaire plus précis : (1) obtenir la BOM détaillée validée par Alpine (masses exactes par matériau et composant), (2) mesurer la consommation énergétique réelle des 4 sites de fabrication (Verkor, Douai, Cléon, Dieppe) à partir de factures site, (3) cartographier les chaînes d'approvisionnement réelles (origines des précurseurs NMC, graphite, NdFeB, aluminium, cuivre) avec distances et modes réels, (4) mesurer la consommation réelle sur route (vs WLTP) pour le profil d'usage sportif Alpine, (5) obtenir les données de durée de vie réelle des pneus Michelin A39 et des disques de frein, (6) préciser les filières de recyclage partenaires d'Alpine pour le pack batterie et les composites.

9. Évaluation d'impact

Répartition par étapes

Étape	Changement climatique (kgCO2e)	Répartition
Matériaux	12984.730	60%
Fabrication	855.768	4%
Transports	478.958	2%
Utilisation	6400.066	30%
Fin de vie	971.642	5%

Émissions totales : 21691.164 kgCO2e

Incertitude totale : ±7%

Liste des facteurs d'émission

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Gaz Naturel – France	France	Ademe Base Carbone v21.0
Gaz Naturel – France	France	ADEME Base Carbone v23.9
Europe (27)	Europe	European Environment Agency 2021
France	France	Ademe Base Empreinte Ademe Base Carbone v23.4

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Train de marchandise (moyenne)	France	Carbo Ademe Base Carbone v21.1
Transport maritime (moyenne)	France	Carbo Ademe Base Carbone v21.1
Camion (moyenne)	France	Carbo Ademe Base Carbone v21.1
Aluminium	France	Carbo Ademe Base Carbone v23.0
Cuivre	France	Ademe Base Carbone v23.0
Electronique (DEEE)	France	Ademe Base Carbone v23.0
Verre	France	Ademe Base Carbone v23.0
Métaux ferreux	France	Ademe Base Carbone v23.0
Métal	France	Carbo Ademe Base Carbone v23.0
Déchets non dangereux en mélange (DIB)	France	Ademe Base Carbone v23.0
Autres plastiques et plastiques complexes	France	Ademe Base Carbone v23.0
Plastique biosourcé PET	France	Carbo Ademe Base Carbone v23.0

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Plâtre et autres contenant du gypse	France	Ademe Base Carbone v23.0
Plastique	France	Ademe Base Carbone v23.0
Acier	France	Carbo Ademe Base Carbone v23.0
Tubes et lampes	France	Ademe Base Carbone v23.0
Charbon actif, granulé	International	Ecoinvent v3.9.1
Aluminium, tôle	International	Ademe Base Impact v2.01
Cuir animal (moyenne)	France	Carbo Ademe Base Impact v2.01
Circuit imprimé nu	International	Ecoinvent v3.9 Le Gargasson P, Pelcat M, Beuve N, Pressigout M, Morin L, Ménard D. PCBnCO: a carbon intensity model of FR-4 printed circuit boards based on company data. In: 2025 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). IEEE; 2025
Tissu en fibre de carbone	International	Doconomy 2030 Calculator
Fibres de carbone	International	ELG Haniel Group, Sustainability Report 2015
Fonte	International	Ecoinvent v3.9.1
Huile combinée (mélange d'huiles)	France	Ademe Agribalyse v3.1

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Cuivre	International	Ademe Base Carbone v21.0
Mix cuivre (99,999% issu de l'électrolyse)	International	Ademe Base Impact v2.01
Équipement électronique (moyenne)	International	Carbo Ademe Base Carbone v21.0
Éthylène glycol	International	Ecoinvent v3.9.1
Fibre de verre	International	Ademe Base Carbone v21.0
Plastique renforcé de fibre de verre, résine polyester, pose à la main	International	Ecoinvent v3.9.1
Plastique renforcé de fibre de verre, polyamide, moulé par injection	International	Ecoinvent v3.9.1
Verre	International	Ademe Base Carbone v21.0
Verre de sécurité laminé	France	Ademe Base Carbone v21.0
Plomb	International	Ademe Base Impact v2.01
Carbonate de lithium	International	Ecoinvent v3.9.1
Aimants – AlNiCo	International	Ademe Base Carbone v21.0

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Tensioactif non ionique	International	Ecoinvent v3.9.1
Tissu De Nylon (Polyamide)	International	Ademe Base Impact v2.01 Doconomy 2030 Calculator
Autres matériaux	International	Carbo
Oxyde NMC811 - Chine	China	Ecoinvent v3.9.1
Plastique - France	France	Ademe Base Carbone v23.4
Plastique, Recyclé - France	France	Ademe Base Carbone v23.4
Moquette polyester ou PET	International	Carbo Ademe Base Impact v2.01
Polymère (moyenne)	International	Carbo Joule, january 2021 - "Manufacturing energy and greenhouse gas emissions associated with plastics consumption"
Plastique Polypropylène (PP) - France	France	Ademe Base Carbone v23.4
Polyuréthane, mousse souple - Europe	Europe	Ecoinvent v3.9.1
Polyuréthane, mousse souple, ignifuge	International	Ecoinvent v3.9.1
Plastique Polychlorure de Vinyle (PVC) -	France	Ademe Base Carbone v23.4

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
France		
Réfrigérant R134a	International	Ecoinvent v3.9.1
Fonte recyclée	International	ADEME Base Carbone v23.6 Ademe Base Carbone v21.0 Ademe Base Carbone v21.1 Carbo Ecoinvent v3.9.1 International Energy Agency 2021
Caoutchouc	International	Carbo Ademe Base Carbone v21.0
Silicium, qualité électronique	International	Ecoinvent v3.9.1
Caoutchouc de silicone	International	Doconomy 2030 Calculator
Acier	France	FEDEREC - Évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse de cycle de vie, 2016
Acier, laminé à chaud	France	Ademe Base Empreinte
Caoutchouc styrène-butadiène (SBR)	International	Doconomy 2030 Calculator
Graphite synthétique, qualité batterie - International	International	Ecoinvent v3.9.1
Phosphore blanc, liquide	International	Ecoinvent v3.9.1

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Teinture/vernis pour bois	International	Doconomy 2030 Calculator
Filé de fibres de polyéthylène	France	Ademe Base Impact v2.01

10. Références

N° référence du document : CARBO-PCP-60a17194-bf31-4c03-bf6f-0154141048bf-0001-FR

Date d'édition : 19/08/2026

Durée de validité : 3 ans

Vérification : Externe

Règles de rédaction : PCP-PCR-ed3-EN-2015 04 02

Conformité : ISO 14067:2018 « Gaz à effet de serre – Empreinte carbone des produits (ECP) »

Source : hellocarbo.com

Carbo[®] est la solution française leader d'Analyse de Cycle de Vie Carbone automatisée. Nous permettons aux fabricants de mesurer, prouver et améliorer la performance carbone de leurs produits en quelques clics, avec une méthodologie reconnue et une transparence totale. Découvrez nos solutions sur hellocarbo.com ou contactez-nous directement.

Note : Toutes les indications mentionnées sur le présent document sont susceptibles de modifications, et ne peuvent donc constituer un engagement de la part de Carbo.