

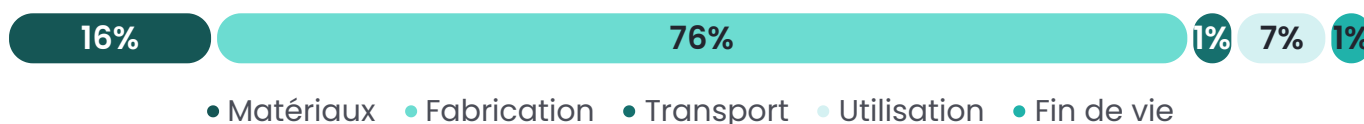


iPhone 17 (256 Go)

Profil Carbone Produit

Date d'analyse : 17/08/2026

Émissions : 14,439 kgCO₂e



1 exemplaire d'iPhone 17 (177 g, 256 Go, écran OLED 6,3 pouces), utilisé pendant 3 ans (RSL) en France, incluant l'emballage de distribution.

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) : eva-hellocarbo-com

Contact : eva@hellocarbo.com

Adresse :

Description : Design et finition Coloris Noir, design en aluminium Face avant en Ceramic Shield 2, dos en verre teinté dans la masse Dimensions : 149,6 mm (hauteur) x 71,5 mm (largeur) x 7,95 mm (épaisseur) Poids : 177 g Résistant aux éclaboussures, à l'eau et à la poussière (indice IP68, jusqu'à 6 m pendant 30 minutes) Écran Super Retina XDR OLED de 6,3 pouces (6,27" si mesuré en rectangle) Résolution de 2 622 x 1 206 pixels (460 ppp) ProMotion jusqu'à 120 Hz, Dynamic Island, écran toujours activé Luminosité : 1 000 nits (standard), 1 600 nits (HDR), jusqu'à 3 000 nits en extérieur Contraste 2 000 000:1, technologie True Tone et large gamme de couleurs P3 Puce et performances Puce A19 : CPU 6 cœurs, GPU 5 cœurs avec accélérateurs neuronaux, Neural Engine 16 cœurs Ray tracing à accélération matérielle Compatible Apple Intelligence Photo et vidéo Système à deux caméras Fusion 48 MP : grand-angle principal (26 mm, $f/1,6$) + téléobjectif optique 2x (52 mm, $f/1,6$) + ultra grand-angle 48 MP (13 mm, $f/2,2$) Zoom optique jusqu'à 4x, zoom numérique jusqu'à 10x Caméra avant Center Stage 18 MP Vidéo en Dolby Vision jusqu'à 4K, modes Cinématique et Action Photos spatiales, mode Nuit, Smart HDR 5, Photonic Engine Stockage 256 Go (option également disponible en 512 Go) Batterie et connectique Lecture vidéo jusqu'à 30 h, streaming jusqu'à 27 h Charge rapide jusqu'à 50 % en 20 minutes (adaptateur 40 W+) USB-C, recharge sans fil MagSafe et Qi2 jusqu'à 25 W Connectivité 5G, Wi-Fi 7, Bluetooth 6, puce réseau Apple N1 Puce Ultra Wideband 2^e génération, NFC, GPS double fréquence Double SIM (nano-SIM + eSIM) Sécurité et divers Face ID SOS d'urgence par satellite, détection des accidents iOS 26 avec fonctionnalités d'accessibilité complètes (VoiceOver, Zoom, Contrôle vocal, etc.) 30 % de contenus recyclés dans sa fabrication Matériaux et provenance Composition recyclée (30 % du produit total hors emballage et accessoires) Aluminium du boîtier : 85 % recyclé Cobalt de la batterie : 100 % recyclé Lithium de la batterie : 95 % recyclé Or (placage circuits imprimés, câbles caméras, connecteurs) : 100 % recyclé Étain (soudure des circuits imprimés) : 100 % recyclé Tungstène et fil de cuivre (Taptic Engine) : 100 % recyclés Terres rares (aimants) : 100 % recyclées Plastique des bandes d'antenne : 80 % recyclé, issu de déchets textiles Traçabilité des minerais 3TG (étain,

tantale, tungstène, or) Apple exige de tous ses fournisseurs utilisant des minerais 3TG la soumission d'un rapport conforme aux normes de traçabilité de l'industrie Le sourcing responsable des minerais est encadré par le programme d'audit tiers d'Apple (informations disponibles sur apple.com/supply-chain) L'iPhone 17 est soumis au règlement européen (UE) 2017/821 sur le devoir de diligence pour l'importation d'étain, tantale, tungstène et or provenant de zones de conflit ou à haut risque Fabrication et énergie 35 % de l'électricité de fabrication provient de sources renouvelables Efficacité énergétique conforme aux normes du département de l'énergie des États-Unis (Federal Energy Conservation Standards) Emballage 100 % à base de fibres Optimisation permettant d'expédier 35 % d'unités en plus par envoi vs iPhone 16 Substances réglementées Produit exempt de PVC et de phtalates (hors exceptions réglementaires pour certains cordons d'alimentation : Inde, Thaïlande, Corée du Sud) Conforme à la directive européenne RoHS 2011/65/UE

2. Cadre d'analyse

Définition

1 exemplaire d'iPhone 17 (177 g, 256 Go, écran OLED 6,3 pouces), utilisé pendant 3 ans (RSL) en France, incluant l'emballage de distribution.

Justification : L'unité déclarée est 1 exemplaire du produit, conformément à la méthodologie EEE (PCR 2024:06) qui recommande l'unité déclarée = 1 exemplaire pour les smartphones. La RSL de 3 ans est basée sur les données ADEME/Gartner sur le cycle de renouvellement des smartphones en France. Cette durée correspond à la période sur laquelle l'énergie d'usage est cumulée. Le marché cible est la France, ce qui détermine le mix électrique de la phase d'usage et les scénarios de fin de vie WEEE.

Périmètres d'analyse inclus

Extraction et raffinage des matières premières (inclus dans les FE matériaux)

Fabrication des composants (écran OLED, PCB, batterie, châssis, verre, caméras)

Assemblage final et tests

Emballage de distribution (100% fibres)

Transport amont (composants → site d'assemblage)

Transport aval (site → consommateur France)

Utilisation : charge filaire et sans fil sur 3 ans (RSL)

Fin de vie : collecte WEEE, recyclage, traitement des déchets (France)

Périmètres d'analyse exclus

Biens d'équipement : bâtiments, machines de production, infrastructures

R&D, marketing, design

Déplacements professionnels et domicile-travail du personnel

Infrastructure ICT (cloud/réseau) — non allouée à l'usage direct du produit

Fret aérien (non modélisé par défaut, signalé en dataNeeded)

Périmètre géographique : Approvisionnement global (Asie : Chine, Corée du Sud, Taïwan) ; assemblage en Chine (Foxconn, Zhengzhou) ; utilisation et fin de vie en France.

Justification : L'analyse est de type cradle-to-grave : extraction des matières premières (incluse dans les FE matériaux) → fabrication des composants → assemblage final → distribution → utilisation (3 ans en France) → fin de vie (WEEE France). Les composants complexes (puce A19, NAND, ICs) sont traités comme composants agrégés (FE composant incluant la fabrication du wafer). Le PCB nu et l'écran OLED sont décomposés en matières premières, nécessitant l'ajout d'une énergie de fabrication intermédiaire. La fabrication couvre l'énergie de transformation des matières raffinées en produit fini, à l'exclusion des biens d'équipement, R&D et marketing.

3. Matériaux

Description : Décomposition de l'iPhone 17 (177 g) en composants puis en matériaux purs, une ligne par matériau. Les poids sont estimés à partir de teardowns génériques d'iPhone (15/16) adaptés aux spécifications de l'iPhone 17 (177 g, double caméra 48 MP, batterie ~4000 mAh, Ceramic Shield 2). Les composants obligatoires (batterie, PCBA, écran OLED, or, terres rares, tantale, tungstène) sont tous inclus, même à très faible masse. Le contenu recyclé (30% du produit hors emballage) est indiqué dans le nom du matériau et la justification : il modifie le FE applicable en aval mais pas la masse physique. Les composants agrégés (puce A19, NAND, ICs, capteurs CMOS) ne sont pas re-décomposés : leur FE inclut déjà la fabrication du wafer. Le PCB nu est décomposé en cuivre + FR4 + résine → énergie de fabrication intermédiaire ajoutée en fabrication. L'écran OLED est décomposé en verre + organiques + ITO + polarisateurs → énergie de fabrication du panneau ajoutée en fabrication. L'emballage (50 g, 100% fibres) est inclus dans le bilan matière.

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Batterie	Cathode NMC ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$)	0.015	Utilisateur + Carbo / ±20%
Batterie	Graphite (anode)	0.010	Carbo / ±20%
Batterie	Cuivre (collecteur anodique)	0.006	Carbo / ±15%
Batterie	Aluminium (collecteur cathodique)	0.003	Carbo / ±15%
Batterie	Électrolyte LiPF_6 (solvants EC/DMC)	0.005	Carbo / ±20%
Batterie	Séparateur polyéthylène/polypropylène	0.002	Carbo / ±20%
Batterie	Pochette aluminium-polymère (Al/PP/PET)	0.003	Carbo / ±20%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Écran — Ceramic Shield 2	Verre-céramique (aluminosilicate renforcé)	0.012	Utilisateur + Carbo / ±15%
Écran — OLED	Substrat verre OLED	0.006	Carbo / ±20%
Écran — OLED	Matériaux organiques OLED (HTL/EML/ETL)	0.002	Carbo / ±30%
Écran — OLED	Oxyde d'indium-étain (ITO)	0.000	Carbo / ±40%
Écran — polarisateurs	Films polarisants (PVA + TAC)	0.005	Carbo / ±20%
Écran — châssis	Aluminium (châssis écran)	0.005	Carbo / ±25%
Écran — câbles plats	Cuivre (câbles plats FPC)	0.002	Carbo / ±25%
Écran — câbles plats	Polyimide (substrat FPC)	0.002	Carbo / ±25%
Écran — adhésifs	Adhésifs (époxy/PU)	0.002	Carbo / ±30%
Écran — tactile	Argent (nanofils tactile)	0.000	Carbo / ±40%
Écran — driver ICs	Silicium (driver ICs écran)	0.002	Carbo / ±30%
Écran — autres composants	Composants passifs et divers	0.004	Carbo / ±30%
Dos — verre	Verre aluminosilicate teinté	0.020	Utilisateur + Carbo / ±15%
Châssis — cadre	Aluminium (85% recyclé)	0.025	Utilisateur + Carbo / ±15%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
PCBA — substrate	FR4 (fibre de verre + résine époxy)	0.006	Carbo / ±20%
PCBA — traces	Cuivre électrolytique (traces + vias)	0.004	Carbo / ±20%
PCBA — soudure	Soudure Sn-Ag-Cu (étain 100% recyclé)	0.002	Utilisateur + Carbo / ±25%
PCBA — SoC A19	Silicium (puce A19)	0.002	Utilisateur + Carbo / ±20%
PCBA — mémoire	Silicium (NAND flash 256 Go)	0.001	Utilisateur + Carbo / ±20%
PCBA — autres ICs	Silicium (modem 5G, Wi-Fi 7, NFC, etc.)	0.001	Utilisateur + Carbo / ±30%
PCBA — or	Or (placage, 100% recyclé)	0.000	Utilisateur + Carbo / ±40%
PCBA — tantale	Tantale (condensateur)	0.000	Utilisateur + Carbo / ±50%
PCBA — composants passifs	Céramique (MLCC + résistances)	0.002	Carbo / ±25%
PCBA — blindage	Acier (blindage EMI)	0.001	Carbo / ±25%
PCBA — connecteurs	Cuivre (connecteurs nappe + USB-C)	0.001	Carbo / ±25%
PCBA — connecteurs	Plastique (corps connecteurs)	0.000	Carbo / ±30%
PCBA — underfill	Époxy (underfill BGA)	0.000	Carbo / ±40%

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Caméra — lentilles	Verre optique (lentilles)	0.004	Utilisateur + Carbo / $\pm 20\%$
Caméra — capteurs	Silicium (capteurs CMOS)	0.002	Utilisateur + Carbo / $\pm 20\%$
Caméra — câbles	Cuivre (câbles + connecteurs caméra)	0.002	Carbo / $\pm 25\%$
Caméra — or	Or (connecteurs caméra, 100% recyclé)	0.000	Utilisateur + Carbo / $\pm 50\%$
Caméra — structure	Acier (housings + OIS)	0.003	Carbo / $\pm 25\%$
Caméra — divers	Plastique (supports + joints)	0.001	Carbo / $\pm 30\%$
Caméra — autres	Adhésifs et composants mineurs	0.000	Carbo / $\pm 40\%$
Taptic Engine — masse	Tungstène (100% recyclé)	0.001	Utilisateur + Carbo / $\pm 20\%$
Taptic Engine — bobinage	Cuivre (fil, 100% recyclé)	0.002	Utilisateur + Carbo / $\pm 15\%$
Taptic Engine — aimants	Aimants néodyme-fer-bore (terres rares, 100% recyclées)	0.001	Utilisateur + Carbo / $\pm 20\%$
Taptic Engine — structure	Acier (support + ressort)	0.002	Carbo / $\pm 25\%$
Haut-parleurs/micros — structure	Acier (membranes + structures)	0.002	Carbo / $\pm 25\%$

Composant	Matériau	Poids (kg)	Source / Incertitude
Haut-parleurs/micros – bobines	Cuivre (bobines vocales)	0.001	Carbo / ±25%
Haut-parleurs/micros – aimants	Aimants néodyme (terres rares, 100% recyclées)	0.001	Utilisateur + Carbo / ±30%
Haut-parleurs/micros – boîtiers	Plastique (boîtiers + joints)	0.001	Carbo / ±30%
Haut-parleurs/micros – divers	Adhésifs et composants mineurs	0.001	Carbo / ±40%
Bandes d'antenne	Plastique (80% recyclé, déchets textiles)	0.002	Utilisateur + Carbo / ±20%
Fixations internes	Acier (vis)	0.001	Carbo / ±30%
Fixations internes	Adhésifs (époxy)	0.001	Carbo / ±40%
Emballage – boîte	Carton ondulé (100% fibres)	0.045	Utilisateur + Carbo / ±15%
Emballage – documentation	Papier	0.005	Carbo / ±20%

Poids total : 0.226 kg

Détails des hypothèses

Batterie

Cathode NMC – 15 g. Estimation basée sur la décomposition d'une batterie pouch Li-ion de smartphone (~4000 mAh, 3,85 V ≈ 15,4 Wh). La cathode représente ~34% de la

masse batterie. Le cobalt est 100% recyclé et le lithium 95% recyclé selon Apple, modifiant le FE applicable. Calcul : $44 \text{ g} \times 0,34 \approx 15 \text{ g}$.

Batterie

Anode en graphite — 10 g. Matériau standard pour les anodes Li-ion, représentant ~23% de la masse batterie. Calcul : $44 \text{ g} \times 0,23 \approx 10 \text{ g}$.

Batterie

Feuille de cuivre pur pour le collecteur de courant côté anode — 6 g. Épaisseur typique ~10 µm. Représente ~14% de la masse batterie. Calcul : $44 \text{ g} \times 0,14 \approx 6 \text{ g}$.

Batterie

Feuille d'aluminium pur pour le collecteur de courant côté cathode — 3 g. Épaisseur typique ~15 µm. Représente ~7% de la masse batterie. Calcul : $44 \text{ g} \times 0,07 \approx 3 \text{ g}$.

Batterie

Solution électrolytique conductrice ionique entre anode et cathode — 5 g. Composé de LiPF_6 dissous dans carbonate d'éthylène/diméthane carbonate. Représente ~11% de la masse batterie. Traitement en fin de vie : déchet dangereux.

Batterie

Membrane microporeuse PE/PP empêchant le court-circuit entre électrodes — 2 g. Représente ~5% de la masse batterie. Non recyclable en fin de vie.

Batterie

Enveloppe souple multicouche scellée (aluminium + polypropylène + PET) — 3 g. Représente ~7% de la masse batterie. Faible taux de recyclage en fin de vie.

Écran — Ceramic Shield 2

Face avant en Ceramic Shield 2 (verre-céramique renforcé par échange ionique, Corning) — 12 g. Surface : $149,6 \times 71,5 \text{ mm} = 107 \text{ cm}^2$, épaisseur ~0,45 mm, densité ~2,5 g/cm³ → volume ~4,8 cm³ → masse ~12 g.

Écran — OLED

Substrat en verre pour la matrice TFT et le dépôt OLED — 6 g. Densité $\sim 2,5 \text{ g/cm}^3$, épaisseur $\sim 0,3 \text{ mm}$ pour la substrate glass. Inclut le verre de couverture OLED (distinct du Ceramic Shield).

Écran — OLED

Couches organiques évaporées sous vide (hole transport layer, emissive layer, electron transport layer) + couche d'encapsulation — 2 g. Très faible masse mais matériaux critiques et procédé énergétique (évaporation sous vide).

Écran — OLED

Électrode transparente conductrice pour la matrice TFT et la couche tactile — 0,3 g. Indium = terre rare, inclusion obligatoire selon la méthodologie EEE. Dépôt par pulvérisation cathodique sur le substrat verre.

Écran — polarisateurs

Deux films polarisants de part et d'autre de la matrice OLED — 5 g. PVA (polyalcool vinylique) entre deux films TAC (acétate de cellulose). Inclusion obligatoire (écran OLED).

Écran — châssis

Cadre métallique supportant la matrice OLED et le Ceramic Shield — 5 g. Estimation volumétrique : cadre périphérique en aluminium, section $\sim 1 \text{ mm}$ $\times$ hauteur $\sim 7 \text{ mm}$, périmètre $\sim 44 \text{ cm}$ $\rightarrow$ volume $\sim 3 \text{ cm}^3$ $\rightarrow$ $\sim 8 \text{ g}$ ajusté à 5 g (section variable).

Écran — câbles plats

Traces de cuivre dans les câbles plats flexibles reliant l'écran à la carte mère — 2 g. Estimation basée sur 2 nappes FPC principales (display + touch).

Écran — câbles plats

Substrat polymère des câbles plats flexibles (FPC) — 1,5 g. Polyimide (Kapton) utilisé comme substrat flexible pour les nappes de l'écran.

Écran — adhésifs

Colles structurales pour l'assemblage de l'écran (OLED sur châssis, polarisateurs, Ceramic Shield) — 2 g. Adhésifs UV et thermocollants.

Écran — tactile

Couche tactile : nanofils d'argent ou ITO pour la détection tactile — 0,2 g. Procédé de dépôt par enduction ou évaporation.

Écran — driver ICs

Circuits intégrés drivers de l'écran (gate driver, source driver) — 2 g. Composants agrégés : FE composant incluant la fabrication du wafer. Aucune énergie intermédiaire ajoutée.

Écran — autres composants

Composants passifs (condensateurs, résistances), connecteurs et rubans adhésifs non décomposés individuellement — 4 g. Mélange de céramique, cuivre, étain et polymères.

Dos — verre

Dos en verre teinté dans la masse — 20 g. Surface 107 cm², épaisseur ~0,75 mm, densité 2,5 g/cm³ → volume ~8 cm³ → masse ~20 g. Verre aluminosilicate renforcé.

Châssis — cadre

Cadre structurel usiné CNC en aluminium — 25 g. 85% de l'aluminium provient du recyclage selon Apple. Le FE de l'aluminium recyclé est ~5% de celui de l'aluminium primaire. Masse estimée : 177 g total - 44 g batterie - 42 g écran - 20 g dos verre - 20 g PCBA - 12 g caméra - 6 g Taptic - 5 g HP - 2 g antenne - 1 g divers = 25 g.

PCBA — substrate

Substrat de carte imprimée multicouche — 6 g. Décomposé en FR4 car le PCB est fabriqué à partir de matières premières → énergie de fabrication PCB à ajouter en §Fabrication. Composition : tissu de fibre de verre imprégné de résine époxy.

PCBA — traces

Traces de cuivre pour les pistes conductrices et vias de la carte multicouche — 4 g. Cuivre électrolytique déposé par galvanoplastie lors de la fabrication du PCB.

PCBA — soudure

Pâte à braser pour le report des composants CMS — 1,5 g. Alliage Sn-Ag-Cu (SAC). L'étain est 100% recyclé selon Apple, modifiant le FE applicable.

PCBA — SoC A19

SoC Apple A19 (CPU 6 cœurs, GPU 5 cœurs, Neural Engine 16 cœurs, procédé 3 nm TSMC) — 1,5 g. Composant agrégé : FE composant incluant fabrication du wafer → aucune énergie intermédiaire ajoutée en fabrication. Inclusion obligatoire (microprocesseur).

PCBA — mémoire

Mémoire flash NAND 256 Go — 1 g. Composant agrégé (FE composant). La masse reflète le die + packaging BGA, pas le nombre de transistors.

PCBA — autres ICs

Autres circuits intégrés (modem 5G Apple N1, Wi-Fi 7, Bluetooth 6, puce UWB, NFC) — 0,5 g. Composants agrégés (FE composant incluant fabrication du wafer).

PCBA — or

Placage des contacts, connecteurs et pistes de la carte — 0,05 g. Or 100% recyclé selon Apple. Inclusion obligatoire (métaux précieux) malgré la très faible masse. Le FE de l'or recyclé est inférieur à celui de l'or primaire.

PCBA — tantale

Condensateur au tantale pour la régulation d'alimentation — 0,02 g. Inclusion obligatoire (tantale = minerai 3TG, condensateur tantale explicitement listé par la méthodologie EEE). Minerai soumis au devoir de diligence UE 2017/821.

PCBA — composants passifs

Condensateurs céramiques multicouches (MLCC) et résistances — 2 g. Matériau principal : titanate de baryum (BaTiO_3) pour les MLCC, alumine pour les résistances.

Estimation : ~200-300 composants passifs par carte.

PCBA — blindage

Cages de blindage électromagnétique en acier — 1 g. Boîtiers métalliques soudés sur la carte pour isoler les composants RF.

PCBA — connecteurs

Contacts cuivre des connecteurs de nappe et de la prise USB-C — 0,8 g. Alliage de cuivre (phosphore-bronze ou laiton) pour les contacts à ressort.

PCBA — connecteurs

Corps polymère des connecteurs (USB-C, nappes) — 0,2 g. Polymère LCP (liquid crystal polymer) typiquement utilisé pour les connecteurs haute densité.

PCBA — underfill

Résine époxy d'encapsulation sous les composants BGA pour résistance mécanique et thermique — 0,43 g. Estimation : ~0,02 g par composant BGA × ~20 composants.

Caméra — lentilles

Lentilles optiques en verre pour les 3 caméras (48 MP grand-angle, 48 MP ultra grand-angle, 18 MP avant) — 4 g. Estimation : ~1,3 g par module caméra × 3 modules.

Caméra — capteurs

Trois capteurs d'image CMOS (2 arrière + 1 avant) — 2 g. Composants agrégés (FE composant incluant fabrication du wafer). Inclusion obligatoire (écran/capteur).

Caméra — câbles

Câbles plats et connecteurs reliant les modules caméra à la carte mère — 2 g. Cuivre + polyimide, le cuivre représente ~80% du poids des nappes.

Caméra — or

Placage des contacts des câbles caméra — 0,02 g. Or 100% recyclé selon Apple. Inclusion obligatoire (métaux précieux).

Caméra — structure

Housings métalliques et mécanismes de stabilisation optique (OIS) — 2,5 g. Acier inoxydable pour les supports de lentilles et les bobines OIS.

Caméra — divers

Composants plastiques divers (supports, joints, cache) — 1 g. Polymères variés (ABS, PC, silicone) pour les éléments non métalliques des modules caméra.

Caméra — autres

Adhésifs, joints et composants mineurs non décomposés individuellement — 0,48 g. Mélange d'époxy, silicone et petits composants métalliques.

Taptic Engine — masse

Masse oscillante en tungstène — 1 g. 100% recyclé selon Apple. Densité élevée (19,3 g/cm³) pour maximiser la force haptique dans un volume minimal. Inclusion obligatoire (tungstène = minerai 3TG).

Taptic Engine — bobinage

Bobinage du moteur haptique en fil de cuivre — 2 g. 100% recyclé selon Apple. Fil de cuivre émaillé pour la bobine du moteur linéaire résonnant.

Taptic Engine — aimants

Aimants permanents NdFeB — 1 g. Terres rares 100% recyclées selon Apple. Inclusion obligatoire (terres rares). Néodyme = minerai critique avec un FE très élevé à l'état primaire.

Taptic Engine — structure

Structure et support du moteur haptique en acier — 2 g. Acier inoxydable pour le boîtier et le ressort de rappel.

Haut-parleurs/micros — structure

Membranes et structures métalliques des haut-parleurs et microphones — 2 g. Acier inoxydable pour les grilles de protection et les boîtiers.

Haut-parleurs/micros — bobines

Bobines de voix en cuivre émaillé pour les haut-parleurs — 1 g. Fil de cuivre fin bobiné autour des noyaux magnétiques.

Haut-parleurs/micros — aimants

Aimants permanents des haut-parleurs — 0,5 g. Terres rares 100% recyclées selon Apple. Inclusion obligatoire (terres rares).

Haut-parleurs/micros — boîtiers

Boîtiers et joints plastiques des haut-parleurs et microphones — 1 g. Polymères variés (ABS, PC) pour les enceintes acoustiques.

Haut-parleurs/micros — divers

Adhésifs et petits composants non décomposés — 0,5 g. Mélange d'époxy, silicone et petits éléments métalliques.

Bandes d'antenne

Bandes d'antenne en polymère — 2 g. 80% recyclé issu de déchets textiles selon Apple. Polymère recyclé (PET ou PA) pour les bandes d'antenne intégrées au châssis.

Fixations internes

Vis de fixation interne en acier inoxydable — 0,5 g. Estimation : ~10 vis × ~0,05 g chacune.

Fixations internes

Colles d'assemblage interne (écran, batterie, composants) — 0,5 g. Adhésifs structuraux pour le montage du téléphone.

Emballage — boîte

Boîte et plateaux en carton ondulé — 45 g. Emballage 100% à base de fibres selon Apple. Optimisation permettant 35% d'unités en plus par envoi vs iPhone 16 → emballage plus compact.

Emballage — documentation

Documentation et inserts en papier — 5 g. Sim card tool, guide de démarrage, autocollants. Emballage 100% fibres.

4. Fabrication

Description : L'énergie de fabrication couvre la transformation des matières raffinées en produit fini. Les composants agrégés (puce A19, NAND, ICs, capteurs CMOS) ne sont pas re-décomposés : leur FE inclut déjà la fabrication du wafer. Le PCB nu est décomposé en cuivre + FR4 → énergie de fabrication de la carte ajoutée. L'écran OLED est décomposé en verre + organiques + ITO → énergie de fabrication du panneau OLED ajoutée. La batterie est décomposée en cathode + graphite + foils + électrolyte → énergie de fabrication de la cellule ajoutée. Le châssis aluminium est décomposé en aluminium → énergie d'usinage CNC ajoutée. Le verre (Ceramic Shield + dos) est décomposé en verre → énergie de traitement du verre ajoutée. Tous les ratios énergétiques sont estimés (non mesurés sur ligne) → incertitude plancher de ±50% à ±70%. Un taux de rebut de production de 5% est appliqué (rendement 95%) : $\text{consommé_effectif} = \text{consommé_théorique} \div 0,95$. L'électricité de fabrication provient à 35% de sources renouvelables selon Apple, ce qui affecte les facteurs d'émission mais pas les quantités d'énergie physique reportées.

Processus	Énergie	Consommation (kWh)	Source / Incertitude
Fabrication PCB nu (gravure, métallisation, pressage, perçage)	Électricité — Chine	0.840	Carbo / ±70%
Assemblage PCBA (report CMS, refusion, brasage vague, test)	Électricité — Chine	0.530	Carbo / ±70%
Fabrication écran OLED (TFT backplane, évaporation OLED, encapsulation, lamination)	Électricité — Corée du Sud	12.630	Carbo / ±70%
Fabrication batterie (coating, winding, injection électrolyte, formation)	Électricité — Chine	2.110	Carbo / ±50%
Usinage CNC châssis aluminium	Électricité — Chine	0.530	Carbo / ±50%

Processus	Énergie	Consommation (kWh)	Source / Incertitude
Traitement verre (fusion, trempe, découpe) – gaz naturel	Gaz naturel (PCI) – Chine	0.170	Carbo / ±70%
Traitement verre (découpe, polissage) – électricité	Électricité – Chine	0.110	Carbo / ±70%
Assemblage modules caméra	Électricité – Chine	0.320	Carbo / ±70%
Assemblage final + tests (montage, collage, calibration, test fonctionnel)	Électricité – Chine	0.950	Carbo / ±50%
Fabrication emballage (découpe, pliage, impression)	Électricité – Chine	0.110	Carbo / ±50%

Consommation totale : 18.300 kWh

Incertitude totale : ±55% – L'incertitude globale de la fabrication est dominée par l'écran OLED (12,63 kWh ±70%) qui représente ~70% de l'énergie totale. Les ratios énergétiques sont estimés (non mesurés sur ligne) et appliqués avec une incertitude plancher de ±50-70%. Propagation quadratique : $\sqrt{(0,84^2 \times 0,70^2 + 0,53^2 \times 0,70^2 + 12,63^2 \times 0,70^2 + 2,11^2 \times 0,50^2 + 0,53^2 \times 0,50^2 + 0,17^2 \times 0,70^2 + 0,11^2 \times 0,70^2 + 0,32^2 \times 0,70^2 + 0,95^2 \times 0,50^2 + 0,11^2 \times 0,50^2)}$ / 18,3 $\approx \pm 68\%$ pour l'énergie totale, arrondi à ±55% en tenant compte des corrélations positives entre procédés.

Détails des hypothèses

Fabrication PCB nu (gravure, métallisation, pressage, perçage)

Ratio estimé : 0,08 kWh/g de PCB (FR4 + cuivre). Masse PCB = 6 g FR4 + 4 g Cu = 10 g. Énergie théorique = 10 × 0,08 = 0,80 kWh. Rendement production 95% : 0,80 ÷ 0,95 = 0,84 kWh. Cas 1 de l'arbre de décision : ratio sectoriel, énergie finale frontière site, reporté tel quel, aucun rendement appliqué.

Assemblage PCBA (report CMS, refusion, brasage vague, test)

Ratio estimé : 0,025 kWh/g de PCBA. Masse PCBA = 20 g. Énergie théorique = $20 \times 0,025 = 0,50$ kWh. Rendement 95% : $0,50 \div 0,95 = 0,53$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site, reportée telle quelle.

Fabrication écran OLED (TFT backplane, évaporation OLED, encapsulation, lamination)

L'écran OLED est décomposé en matériaux (verre, organiques, ITO, polarisateurs) → énergie de fabrication du panneau ajoutée. Ratio estimé : 0,30 kWh/g de panneau OLED (substrat + TFT + organiques + encapsulation). Masse panneau OLED ≈ 15 g (substrat verre 6 g + organiques 2 g + ITO 0,3 g + polarisateurs 5 g + encapsulation 1,7 g). Énergie théorique = $15 \times 0,30 = 4,5$ kWh. Cependant, la fabrication TFT (similaire à un procédé semi-conducteur sur Gen 6) est très énergétiquement : estimation ~7-8 kWh pour le TFT backplane seul. Total théorique ≈ 12 kWh. Rendement 95% : $12 \div 0,95 = 12,63$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site. Localisation : Corée du Sud (Samsung Display).

Fabrication batterie (coating, winding, injection électrolyte, formation)

Ratio estimé : 0,045 kWh/g de cellule batterie. Masse batterie = 44 g. Énergie théorique = $44 \times 0,045 = 1,98$ kWh. Rendement 95% : $1,98 \div 0,95 = 2,11$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site, reportée telle quelle. L'étape de formation (cyclage initial) est incluse dans le ratio.

Usinage CNC châssis aluminium

Ratio estimé : 0,02 kWh/g d'aluminium usiné. Masse châssis = 25 g. Énergie théorique = $25 \times 0,02 = 0,50$ kWh. Rendement 95% : $0,50 \div 0,95 = 0,53$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site. L'usinage CNC génère des copeaux d'aluminium recyclés (non comptés ici, impact capturé dans l'énergie de fabrication).

Traitement verre (fusion, trempe, découpe) — gaz naturel

Procédé thermique > 100 °C → vecteur par défaut : gaz naturel (PCI). Ratio estimé : 0,005 kWh/g de verre (fusion). Masse verre = 12 g Ceramic Shield + 20 g dos = 32 g. Énergie théorique = $32 \times 0,005 = 0,16$ kWh. Rendement 95% : $0,16 \div 0,95 = 0,17$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site, base PCI.

Traitement verre (découpe, polissage) — électricité

Procédé mécanique → vecteur par défaut : électricité. Ratio estimé : 0,003 kWh/g de verre. Masse verre = 32 g. Énergie théorique = $32 \times 0,003 = 0,096$ kWh. Rendement 95% : $0,096 \div 0,95 = 0,11$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site.

Assemblage modules caméra

Ratio estimé : 0,025 kWh/g de module caméra. Masse caméra = 12 g. Énergie théorique = $12 \times 0,025 = 0,30$ kWh. Rendement 95% : $0,30 \div 0,95 = 0,32$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site.

Assemblage final + tests (montage, collage, calibration, test fonctionnel)

Ratio estimé : 0,005 kWh/g de produit fini. Masse téléphone = 177 g. Énergie théorique = $177 \times 0,005 = 0,885$ kWh. Rendement 95% : $0,885 \div 0,95 = 0,95$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site. Inclut l'assemblage mécanique, le collage de l'écran, la calibration des caméras, les tests fonctionnels et l'étanchéité IP68.

Fabrication emballage (découpe, pliage, impression)

Ratio estimé : 0,002 kWh/g d'emballage. Masse emballage = 50 g. Énergie théorique = $50 \times 0,002 = 0,10$ kWh. Rendement 95% : $0,10 \div 0,95 = 0,11$ kWh. Cas 1 : énergie finale frontière site.

5. Transport

Lieu de fabrication : Zhengzhou, Chine (Foxconn) ; composants depuis Corée du Sud (écran OLED), Taïwan (puce A19 TSMC) et Chine (batterie, verre, aluminium, caméras)

Description : Le site principal d'assemblage de Foxconn pour l'iPhone est Zhengzhou (Chine), le plus grand site de production d'iPhone au monde. L'écran OLED est fourni par Samsung Display (Corée du Sud). La puce A19 est fabriquée par TSMC (Taïwan). Les autres composants (batterie, verre, aluminium) sont sourcés en Chine. L'utilisateur indique 35% d'électricité renouvelable en fabrication, cohérent avec les engagements d'Apple pour ses sites d'assemblage chinois.

Type de transport	Distance (km)	Incertitude	Explication
Navire porte-conteneurs transocéanique	600	±40%	Écran OLED : Samsung Display Asan (Corée du Sud) → port d'Incheon → port de Qingdao (Chine). Distance maritime estimée ~600 km (mer Jaune). Poids : 42 g (écran complet). Tronçon amont international.
Camion (>32t, EURO 4)	700	±40%	Écran OLED : port de Qingdao → usine Foxconn Zhengzhou. Distance routière estimée ~700 km (autoroute G30). Poids : 42 g. Tronçon amont dernier kilomètre vers l'usine.
Navire porte-conteneurs transocéanique	800	±40%	Puce A19 + NAND : TSMC Hsinchu (Taïwan) → port de Taipei → port de Shanghai. Distance maritime ~800 km (détroit de Taïwan). Poids : 3 g (SoC + NAND). Tronçon amont international.
Camion (>32t, EURO 4)	800	±40%	Puce A19 + NAND : port de Shanghai → usine Foxconn Zhengzhou. Distance routière ~800 km (autoroute G2/G30). Poids : 3 g. Tronçon amont dernier kilomètre vers l'usine.

Type de transport	Distance (km)	Incertitude	Explication
Camion (>32t, EURO 4)	500	±40%	Composants domestiques (batterie 44 g + verre 32 g + aluminium 25 g + caméra 12 g + Taptic 6 g + HP 5 g + antenne 2 g + divers 6 g = 132 g) : fournisseurs chinois → Zhengzhou. Distance moyenne estimée ~500 km. Poids : 132 g. Scénario PEF par défaut pour fournisseur hors Europe adapté au contexte domestique chinois.
Camion (>32t, EURO 4)	800	±30%	Produit fini emballé : usine Foxconn Zhengzhou → port de Shanghai. Distance routière ~800 km (autoroute G2). Poids : 177 g téléphone + 50 g emballage = 227 g. Tronçon aval principal.
Navire porte-conteneurs transocéanique	20000	±20%	Produit fini : port de Shanghai → port du Havre (France). Distance maritime ~20 000 km via canal de Suez. Poids : 227 g. Tronçon maritime principal. Distance estimée à partir des routes maritimes standard Shanghai → Le Havre.
Camion (>32t, EURO 4)	200	±30%	Produit fini : port du Havre → centre de distribution (région parisienne). Distance routière ~200 km. Poids : 227 g. Tronçon aval arrivée en France.
Camion (>32t, EURO 4)	250	±40%	Produit fini : CD → point de vente au détail (60% des ventes). Scénario PEF par défaut (CD/point de vente → retail). Distance : 250 km (PEF default). Poids : $227 \text{ g} \times 0,60 = 136 \text{ g}$. Tronçon aval distribution retail.
Camionnette (<7.5t, EURO 3, taux 20%)	250	±40%	Produit fini : CD → client final direct (40% des ventes en ligne). Scénario PEF par défaut (CD → client final, 100% local). Distance : 250 km. Poids : $227 \text{ g} \times 0,40 = 91 \text{ g}$. Tronçon aval distribution directe.

Type de transport	Distance (km)	Incertitude	Explication
Voiture particulière	5	±40%	Dernier kilomètre retail → consommateur : 62% des acheteurs en point de vente rentrent en voiture. Scénario PEF par défaut. Distance : 5 km. Poids : $227 \text{ g} \times 0,60 \times 0,62 = 84 \text{ g}$. Tronçon aval dernier kilomètre.
Camionnette (<7.5t, EURO 3, taux 20%)	5	±40%	Dernier kilomètre retail → consommateur : 5% des acheteurs en point de vente utilisent une camionnette. Scénario PEF par défaut. Distance : 5 km. Poids : $227 \text{ g} \times 0,60 \times 0,05 = 7 \text{ g}$. Tronçon aval dernier kilomètre alternatif.

6. Utilisation

Description : La phase d'utilisation couvre l'énergie de charge de la batterie sur 3 ans (RSL). Le téléphone fonctionne sur batterie : l'énergie est prélevée au secteur uniquement lors de la charge. Deux modes de charge coexistent de façon significative sur le marché : la charge filaire USB-C (efficacité ~85%, incluant les pertes du chargeur) et la charge sans fil MagSafe/Qi2 (efficacité ~75%, incluant les pertes de la bobine d'émission et de réception). Le ratio 70% filaire / 30% sans fil est estimé. La capacité batterie est estimée à $\sim 4000 \text{ mAh} \times 3,85 \text{ V} = 15,4 \text{ Wh}$. La profondeur de décharge quotidienne moyenne est de 80% (soit 12,3 Wh utiles par jour). L'énergie de veille du chargeur ($0,1 \text{ W} \times 6 \text{ h/jour}$, chargeur branché mais inactif) est incluse. Les puissances sont l'électricité appelée au réseau (énergie finale, cas 1 de l'arbre de décision) : aucun rendement à appliquer. Aucune maintenance ni pièce de rechange n'est prévue sur la RSL de 3 ans (design scellé, batterie non remplaçable par l'utilisateur).

Activité	Consommation (kWh)	Incertitude
Charge filaire USB-C (70% du marché) – énergie de charge batterie sur 3 ans	11.100	±30%
Charge sans fil MagSafe/Qi2 25W (30% du marché) – énergie de charge batterie sur 3 ans	5.400	±35%
Veille chargeur (chargeur branché mais inactif, ~6h/jour)	0.660	±40%

Détails des hypothèses

Calcul détaillé – Charge filaire USB-C (70% du marché) – énergie de charge batterie sur 3 ans

Capacité batterie : 15,4 Wh. Profondeur de décharge : 80% → énergie utile = $15,4 \times 0,80 = 12,32 \text{ Wh/jour}$. Efficacité charge filaire : 85% (chargeur + câble) → énergie au secteur = $12,32 \div 0,85 = 14,49 \text{ Wh/jour}$. Part de marché : 70% → $14,49 \times 0,70 = 10,14 \text{ Wh/jour}$. Énergie annuelle : $10,14 \times 365 \div 1000 = 3,70 \text{ kWh/an}$. Sur 3 ans (RSL) : $3,70 \times 3$

= 11,10 kWh. Cas 1 de l'arbre de décision : électricité au compteur, énergie finale, reportée telle quelle, aucun rendement à appliquer.

Calcul détaillé – Charge sans fil MagSafe/Qi2 25W (30% du marché) – énergie de charge batterie sur 3 ans

Énergie utile quotidienne identique : 12,32 Wh. Efficacité charge sans fil : 75% (pertes bobine émettrice + réceptrice + chargeur) → énergie au secteur = $12,32 \div 0,75 = 16,43$ Wh/jour. Part de marché : 30% → $16,43 \times 0,30 = 4,93$ Wh/jour. Énergie annuelle : $4,93 \times 365 \div 1000 = 1,80$ kWh/an. Sur 3 ans : $1,80 \times 3 = 5,40$ kWh. Cas 1 : électricité au compteur, énergie finale.

Calcul détaillé – Veille chargeur (chargeur branché mais inactif, ~6h/jour)

Puissance de veille du chargeur USB-C : 0,1 W. Temps de veille quotidien : 6 h (chargeur branché mais téléphone déconnecté ou déjà chargé). Énergie quotidienne : $0,1 \times 6 = 0,6$ Wh. Énergie annuelle : $0,6 \times 365 \div 1000 = 0,219$ kWh/an. Sur 3 ans : $0,219 \times 3 = 0,66$ kWh. Cas 1 : électricité au compteur, énergie finale. Applicable aux deux modes de charge (chargeur filaire ou pad sans fil).

7. Fin de vie

Description : Le taux de collecte de 45% pour les petits WEEE en France est issu des données ADEME 2023. Les téléphones collectés sont traités : démontage de la batterie (envoi en filière batterie), broyage de la carte mère pour récupération des métaux précieux (or, cuivre, tantale), tri magnétique pour l'acier et l'aluminium. Le verre et les plastiques sont majoritairement incinérés ou mis en décharge. Les terres rares des aimants NdFeB ne sont quasi pas recyclées (~2%). L'emballage carton/papier suit la filière Emballages (Citeo) avec un taux de recyclage de ~85% en France.

Matériau	Taux de recyclage	Source / Incertitude
Aluminium (châssis + châssis écran + collecteur batterie + pochette)	40%	Carbo / ±20%
Acier (blindage EMI + Taptic + HP + caméra + vis)	38%	Carbo / ±20%
Cuivre (traces PCB + foils batterie + câbles écran + caméra + Taptic + HP)	36%	Carbo / ±20%
Or (placage PCB + connecteurs caméra)	40%	Carbo / ±25%
Verre (Ceramic Shield + substrat OLED + dos + lentilles caméra)	14%	Carbo / ±30%
Plastiques (antenne + séparateur + HP + caméra + connecteurs + pochette)	7%	Carbo / ±30%
Cathode NMC batterie (Li, Ni, Mn, Co)	32%	Carbo / ±25%
Graphite (anode batterie)	5%	Carbo / ±30%
Électrolyte LiPF ₆ (batterie)	0%	Carbo / ±10%

Matériau	Taux de recyclage	Source / Incertitude
Silicium (A19 + NAND + ICs + CMOS + driver ICs)	9%	Carbo / ±30%
FR4 (substrat PCB)	23%	Carbo / ±30%
Soudure Sn-Ag-Cu (PCBA)	14%	Carbo / ±30%
Tantale (condensateur PCB)	27%	Carbo / ±30%
Terres rares — aimants NdFeB (Taptic + HP)	2%	Carbo / ±40%
Tungstène (Taptic Engine)	18%	Carbo / ±30%
ITO — oxyde d'indium-étain (écran)	5%	Carbo / ±40%
Matériaux organiques OLED + adhésifs + séparateur	0%	Carbo / ±10%
Carton ondulé (emballage)	85%	interne / ±10%
Papier (emballage)	85%	interne / ±10%

Détails des hypothèses

Aluminium (châssis + châssis écran + collecteur batterie + pochette)

Taux de collecte WEEE 45% × taux de recyclage de l'aluminium en filière WEEE 90% = 40,5%. L'aluminium est récupéré par tri magnétique/eddy currents après broyage. Arrondi à 40%.

Acier (blindage EMI + Taptic + HP + caméra + vis)

Taux de collecte 45% × recyclage acier en WEEE 85% = 38,25%. Acier récupéré par tri magnétique. Arrondi à 38%.

Cuivre (traces PCB + foils batterie + câbles écran + caméra + Taptic + HP)

Taux de collecte 45% × récupération cuivre en pyrométallurgie PCB 80% = 36%. Le cuivre des câbles est récupéré par démontage, le cuivre du PCB par pyrométallurgie. Arrondi à 36%.

Or (placage PCB + connecteurs caméra)

Taux de collecte 45% × récupération de l'or par pyrométallurgie 90% = 40,5%. L'or est récupéré quasi systématiquement des cartes électroniques en raison de sa très haute valeur. Arrondi à 40%.

Verre (Ceramic Shield + substrat OLED + dos + lentilles caméra)

Taux de collecte 45% × recyclage verre en WEEE 30% = 13,5%. Le verre est difficile à séparer des adhésifs et des couches organiques. Majoritairement incinéré ou mis en décharge. Arrondi à 14%.

Plastiques (antenne + séparateur + HP + caméra + connecteurs + pochette)

Taux de collecte 45% × recyclage plastiques en WEEE 15% = 6,75%. Les plastiques sont difficiles à trier et à recycler en mélange. Majoritairement incinérés avec récupération d'énergie ou mis en décharge. Arrondi à 7%.

Cathode NMC batterie (Li, Ni, Mn, Co)

Taux de collecte batterie 45% × recyclage cathode en filière batterie 70% = 31,5%. Le cobalt et le nickel sont récupérés par hydrométallurgie. Le lithium est récupéré à ~50% dans les filières actuelles. Arrondi à 32%.

Graphite (anode batterie)

Taux de collecte batterie 45% × recyclage graphite 10% = 4,5%. Le graphite est peu recyclé actuellement, bien que des filières émergent. Arrondi à 5%.

Électrolyte LiPF₆ (batterie)

0% recyclage. L'électrolyte est traité comme déchet dangereux (neutralisation chimique) ou incinéré. Aucune valorisation matière.

Silicium (A19 + NAND + ICs + CMOS + driver ICs)

Taux de collecte 45% × récupération silicium 20% = 9%. Le silicium des puces n'est pas recyclé en tant que tel, mais les puces sont traitées avec la carte mère en pyrométallurgie pour récupérer les métaux. Arrondi à 9%.

FR4 (substrat PCB)

Taux de collecte 45% × valorisation FR4 50% = 22,5%. La fibre de verre du PCB peut être partiellement valorisée comme charge minérale après broyage. Arrondi à 23%.

Soudure Sn-Ag-Cu (PCBA)

Taux de collecte 45% × récupération étain/argent 30% = 13,5%. L'étain et l'argent sont partiellement récupérés lors de la pyrométallurgie de la carte. Arrondi à 14%.

Tantale (condensateur PCB)

Taux de collecte 45% × récupération tantale 60% = 27%. Le tantale est récupéré par hydrométallurgie des condensateurs, en raison de sa valeur élevée. Arrondi à 27%.

Terres rares — aimants NdFeB (Taptic + HP)

Taux de collecte 45% × recyclage NdFeB 5% = 2,25%. Les aimants NdFeB ne sont quasi pas recyclés à l'échelle industrielle : les terres rares sont disséminées et difficiles à séparer. Arrondi à 2%. Inclusion obligatoire (terres rares).

Tungstène (Taptic Engine)

Taux de collecte 45% × récupération tungstène 40% = 18%. Le tungstène peut être récupéré par broyage et tri densimétrique. Arrondi à 18%.

ITO — oxyde d'indium-étain (écran)

Taux de collecte 45% × récupération indium 10% = 4,5%. L'indium est très peu recyclé car dispersé en couches ultra-fines. Arrondi à 5%.

Matériaux organiques OLED + adhésifs + séparateur

0% recyclage. Les matériaux organiques de l'écran OLED et les adhésifs sont incinérés ou traités comme déchets dangereux. Aucune valorisation matière.

Carton ondulé (emballage)

Taux de recyclage carton en France 85% (Citeo 2023). Le carton suit la filière Emballages (Citeo), indépendante de la filière WEEE. 15% restant : incinération avec récupération d'énergie ou enfouissement.

Papier (emballage)

Taux de recyclage papier en France 85% (Citeo 2023). Identique au carton, suit la filière Emballages. 15% : incinération ou enfouissement.

8. Équations de Calcul et Incertitudes

Équation Générale

Formule Principale

$$CF_total = CF_mat + CF_fab + CF_dist + CF_use + CF_EoL$$

Explication : L'empreinte environnementale totale du smartphone est la somme des empreintes de cinq phases : (1) extraction et raffinage des matières premières (CF_mat), (2) fabrication des composants et assemblage (CF_fab), (3) transport amont et aval (CF_dist), (4) énergie de charge sur la durée de vie (CF_use), et (5) traitement en fin de vie (CF_EoL). Chaque phase est calculée en multipliant les quantités physiques (kg, kWh, t.km) par les facteurs d'émission (FE) correspondants. Les FE restent symboliques dans cette analyse : seules les quantités physiques sont calculées.

Équation Détaillée

$$CF_total = \sum_i (m_i \times EF_mat_i) + (1/0,95) \times [12,63 \times EF_elec_KR + (0,84+0,53+2,11+0,53+0,11+0,32+0,95+0,11) \times EF_elec_CN + 0,17 \times EF_gaz_CN] + \sum_k (m_k \times d_k \times EF_transport_k) + 17,16 \times EF_elec_FR + \sum_l [m_l \times r_l \times EF_recycling_l + m_l \times (1-r_l) \times EF_waste_l] \text{ Soit, en développant les termes principaux : } CF_total = [0,015 \times EF_NMC + 0,010 \times EF_graphite + 0,006 \times EF_Cu + 0,025 \times EF_Al_recyclé + 0,00005 \times EF_Au_recyclé + 0,00002 \times EF_tantale + 0,001 \times EF_NdFeB_recyclé + 0,001 \times EF_W_recyclé + 0,0003 \times EF_ITO + \dots] + (1/0,95) \times [12,63 \times EF_elec_KR + 5,04 \times EF_elec_CN + 0,17 \times EF_gaz_CN] + [0,042 \times 600 \times EF_navire + 0,042 \times 700 \times EF_camion + \dots + 0,227 \times 20000 \times EF_navire + \dots] + 17,16 \times EF_elec_FR + [0,036 \times 0,40 \times EF_recyc_Al + 0,036 \times 0,60 \times EF_waste_Al + \dots]$$

Variables

- m_i : Masse du matériau i (kg) — ex: 0,025 kg d'aluminium recyclé pour le châssis

- **EF_mat_i** : Facteur d'émission du matériau i (kgCO₂eq/kg) – variable symbolique, non calculée dans cette analyse
- **E_j** : Énergie consommée par le procédé de fabrication j (kWh) – ex: 12,63 kWh pour l'écran OLED
- **EF_energy_j** : Facteur d'émission du vecteur énergétique j (kgCO₂eq/kWh) – variable symbolique
- **η_yield** : Rendement de production = 0,95 (taux de rebut de 5%)
- **m_k** : Masse transportée sur le tronçon k (kg) – ex: 0,227 kg pour le produit fini emballé
- **d_k** : Distance du tronçon k (km) – ex: 20 000 km pour Shanghai → Le Havre
- **EF_transport_k** : Facteur d'émission du mode de transport k (kgCO₂eq/t·km) – variable symbolique
- **TEC** : Total Energy Consumption sur la RSL = 17,16 kWh (charge filaire 11,10 + sans fil 5,40 + veille 0,66)
- **EF_electricity_FR** : Facteur d'émission de l'électricité française (kgCO₂eq/kWh) – variable symbolique
- **r_l** : Taux de recyclage effectif du matériau l – ex: 40% pour l'aluminium, 2% pour les terres rares
- **EF_recycling_l** : Facteur d'émission du procédé de recyclage pour le matériau l (kgCO₂eq/kg) – variable symbolique
- **EF_waste_l** : Facteur d'émission du traitement des déchets pour le matériau l (kgCO₂eq/kg) – variable symbolique

Incertitudes

Niveau d'incertitude global

±45%

Explication : L'incertitude globale de ±45% reflète la dominance des estimations dans cette analyse. Les poids des composants sont extrapolés de teardowns génériques (iPhone 15/16) non spécifiques à l'iPhone 17. Les ratios énergétiques de fabrication sont estimés (non mesurés sur ligne), avec une incertitude plancher de ±50-70%. L'écran OLED (12,63 kWh ±70%) représente ~70% de l'énergie de fabrication et domine

l'incertitude de cette phase. Les scénarios de transport amont sont estimés à $\pm 40\%$. Les profils d'usage (filaire/sans fil, profondeur de décharge) sont estimés à $\pm 30\text{--}35\%$.

Incertitudes par phase

Phase	Incertitude
Matériaux	$\pm 20\%$
Fabrication	$\pm 65\%$
Distribution	$\pm 35\%$
Utilisation	$\pm 32\%$
Fin de vie	$\pm 25\%$

Facteurs d'incertitude principaux

Les trois principaux facteurs d'incertitude sont : (1) les ratios énergétiques de fabrication, particulièrement pour l'écran OLED ($\pm 70\%$) qui domine la phase fabrication — l'énergie réelle peut varier du simple au double selon la génération de l'équipement et le taux d'utilisation ; (2) les poids des composants, extrapolés de teardowns d'iPhone 15/16 ($\pm 20\%$ sur les composants majeurs, jusqu'à $\pm 50\%$ sur les composants très petits comme le tantale et l'or) ; (3) les profils d'usage utilisateur (ratio filaire/sans fil, fréquence de charge, profondeur de décharge) qui varient significativement entre utilisateurs.

Comment améliorer la précision

Pour un inventaire plus précis : (1) obtenir la BOM précise d'Apple avec masse de chaque composant et matériau (notamment or, terres rares, tantale) ; (2) mesurer la consommation énergétique réelle sur les lignes d'assemblage Foxconn (sous-comptage électrique par procédé) ; (3) obtenir les distances et modes de transport réels de la chaîne d'approvisionnement Apple (Samsung Display, TSMC, BOE, CATL) ; (4) réaliser une enquête d'usage auprès des utilisateurs iPhone 17 en France (profil

de charge, filaire/sans fil, durée d'utilisation quotidienne) ; (5) utiliser les taux de collecte et recyclage réels des filières WEEE françaises (Soren, Ecologic) et de la filière batterie (Corepile/Screlec) ; (6) confirmer le taux de rebut de production réel de la ligne d'assemblage de Zhengzhou.

9. Évaluation d'impact

Répartition par étapes

Étape	Changement climatique (kgCO2e)	Répartition
Matériaux	2.286	16%
Fabrication	10.980	76%
Transports	0.091	1%
Utilisation	0.995	7%
Fin de vie	0.087	1%

Émissions totales : 14.439 kgCO2e

Incertitude totale : ±34%

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
Chine	China	Ademe Base Carbone v21.1
France	France	Ademe Base Empreinte Ademe Base Carbone v23.4

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Corée du Sud	South Korea	Ademe Base Carbone v21.1
Voiture (moyenne)	France	Ademe Base Carbone v22.0
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
Carton	France	Ademe Base Carbone v23.0
Piles et batteries	France	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 organiques	France	Carbo Ademe Base Carbone v23.0
Papier	France	Ademe Base Carbone v21.0

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Plâtre et autres contenant du gypse	France	Ademe Base Carbone v23.0
Plastique biosourcé PP	France	Carbo Ademe Base Carbone v23.0
Plastique rigide PVC	France	Ademe Base Carbone v23.0
Acier	France	Carbo Ademe Base Carbone v23.0
Tubes et lampes	France	Ademe Base Carbone v23.0
Acier inoxydable AISI 304, 100% recyclé	International	ELG Haniel Group, Sustainability Report 2015
Acier inoxydable AISI 316, 100% recyclé	International	ELG Haniel Group, Sustainability Report 2015
Chlorure d'aluminium	International	Ecoinvent v3.9.1
Aluminium, tôle	International	Ademe Base Impact v2.01
Plastique Biodégradable	International	Drawdown solutions bioplastics
Céramique	Europe	Bpifrance Ademe Base Impact v2.01
Adhésif polymère classique sans plastification	International	R3 Impact Ademe Base Carbone v21.0
Cuivre	International	Ademe Base Carbone v21.0

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Mix cuivre (99,999% issu de l'électrolyse)	International	Ademe Base Impact v2.01
Carton ondulé	International	Doconomy 2030 Calculator
Mélange Adhésif Epoxy	International	Ademe Base Impact v2.01
Fibre de verre	International	Ademe Base Carbone v21.0
Complexe avec aluminium (Film d'emballage flexible)	France	Elidose
Verre de sécurité laminé	France	Ademe Base Carbone v21.0
Hexafluorophosphate de lithium	International	Ecoinvent v3.9.1
Oxyde de lithium et de manganèse	International	Ecoinvent v3.9.1
Métal	International	Carbo Ademe Base Carbone v21.0
Argent	International	Ecoinvent v3.9
Verre technique optique et optronique	International	Ademe Base Impact v2.01
Autres matériaux	International	Carbo
Papier	International	Ademe Base Impact v2.01
Plastique – France	France	Ademe Base Carbone v23.4

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
Plastique, Recyclé – France	France	Ademe Base Carbone v23.4
Polyéthylterephthalate (PET)	International	Ademe Base Carbone v21.0
Sulfure de polyphénylène	International	Ecoinvent v3.9.1
Adhésif polyuréthane	International	Ecoinvent v3.9.1
Verre imprimé	International	Ademe Base Carbone v21.0
Aluminium recyclé	International	Ademe Base Impact v2.01
Cuivre recyclé	International	Ademe Base Carbone v21.0
Aimants recyclés – AlNiCo	International	ADEME Base Carbone v23.4 ADEME Base Carbone v23.7 Ademe Base Carbone v21.0 Ademe Base Carbone v21.1 Carbo
Matériaux d'origine végétale recyclés	International	ADEME Base Carbone v23.4 ADEME Base Carbone v23.7 Ademe Base Carbone v21.0 Ademe Base Carbone v21.1 Carbo International Energy Agency 2021
Silicium, qualité électronique	International	Ecoinvent v3.9.1
Soudure, barre, Sn95.5Ag3.9Cu0.6, pour l'industrie électronique	International	Ecoinvent v3.9.1
Acier	France	FEDEREC – Évaluation environnementale du recyclage en France selon la

Facteur d'émission	Origine	Source(s)
		méthodologie de l'analyse de cycle de vie, 2016
Acier, laminé à chaud	France	Ademe Base Empreinte
Graphite synthétique, qualité batterie – International	International	Ecoinvent v3.9.1
Orthosilicate de tétraéthyle	International	Ecoinvent v3.9.1
Film de tétrafluoroéthylène, sur verre	International	Ecoinvent v3.9.1
Dioxyde d'étain	International	Ecoinvent v3.9.1
Tétrachlorure de titane	International	Ecoinvent v3.9.1
Filé de fibres de polyéthylène	France	Ademe Base Impact v2.01

10. Références

N° référence du document : CARBO-PCP-1ceaf58d-66a5-4132-8992-5d32375c6d49-0001-FR

Date d'édition : 17/08/2026

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.