

Convergence matérielle des équipements numériques

Validité de l'approche par familles génériques
pour l'évaluation des risques d'approvisionnement

Stéphan Peccini

Stéphan Peccini Conseil

Mars 2026

Résumé

L'évaluation des risques d'approvisionnement en matériaux critiques pour les équipements numériques exige de connaître la composition matérielle de ces équipements. Or les fabricants ne publient pas leurs nomenclatures détaillées. Ce document examine si une approche par archétypes génériques — profils de composition par famille de produits ou de composants, sans distinction de marque ni de modèle — fournit une précision suffisante pour un indice de tendance de risque. L'analyse croise les résultats de six études de référence portant sur le démontage, la modélisation par bases d'inventaire de cycle de vie et la quantification d'incertitude en analyse de flux de matières. Elle conclut que l'approche générique est validée pour la quasi-totalité des familles d'équipements numériques, avec une erreur relative moyenne de 26 % et une variance intra-catégorie inférieure à 2,5 %, toutes deux compatibles avec un indice de tendance.

Table des matières

1	Contexte et objectif	3
2	Méthode d'estimation par bases d'inventaire de cycle de vie	3
2.1	Principe du paramètre d'incorporation	3
2.2	Résultats quantitatifs : le chiffre de 26 %	3
3	Stabilité de la composition intra-catégorie	4
3.1	Démontage de 95 produits sur 25 catégories	4
3.2	Ordinateurs portables sur une décennie	4
3.3	Smartphones sur vingt ans	5

4	Incertitude en contexte : cadre de référence	5
4.1	Incertitude intrinsèque d'un produit spécifique	5
4.2	Échelle de référence en analyse de flux de matières	5
5	Convergence oligopolistique upstream	5
5.1	Assemblage : divergence marginale	6
5.2	Composants : convergence oligopolistique	6
5.3	Minéraux : convergence par construction	6
5.4	Critère formel de suffisance	6
6	Vérification par famille de la taxonomie FabNum	7
6.1	Produits finaux	7
6.2	Composants	8
6.3	Point de vigilance : les batteries	10
7	Synthèse	10

1 Contexte et objectif

Le modèle FabNum évalue l'exposition d'une organisation aux risques d'approvisionnement en matériaux critiques liés à ses équipements numériques. Il repose sur une taxonomie à trois niveaux : produits finaux (serveurs, ordinateurs portables, smartphones...), composants (processeurs, mémoire RAM, batteries...) et minéraux (cobalt, tantale, terres rares...).

À chaque niveau, FabNum utilise des profils de composition génériques : un « serveur » est caractérisé par un profil unique, sans distinguer un Dell PowerEdge d'un HP ProLiant ou d'un Lenovo ThinkSystem. Cette simplification est nécessaire — les fabricants ne publient pas leurs nomenclatures détaillées — mais elle soulève une question de validité : *l'erreur introduite par la généricité est-elle acceptable pour un indice de tendance de risque ?*

Ce document répond à cette question en examinant la littérature scientifique sur la composition matérielle des équipements électroniques et en vérifiant systématiquement la validité de l'approche pour chaque famille de la taxonomie FabNum.

2 Méthode d'estimation par bases d'inventaire de cycle de vie

2.1 Principe du paramètre d'incorporation

AMATUNI et al. (2024) ont développé une méthode qui exploite les bases d'inventaire de cycle de vie (LCI), en particulier ecoinvent, pour estimer la composition matérielle de produits manufacturés. Le principe repose sur la distinction entre les flux matériels *incorporés* dans le produit final (le cuivre de la carte mère d'un ordinateur) et les flux *non incorporés* (le cuivre des machines de l'usine qui fabrique cet ordinateur).

Chaque flux d'une base LCI se voit attribuer un *paramètre d'incorporation* : 1 si le matériau entre intégralement dans le produit, 0 s'il n'y entre pas, ou une valeur intermédiaire pour les pertes de fabrication. Un algorithme de filtrage par mots-clés affecte automatiquement ces paramètres à l'ensemble de la base ecoinvent (environ 18 000 activités), puis un calcul matriciel dérive la composition matérielle de n'importe quel produit de la base.

2.2 Résultats quantitatifs : le chiffre de 26 %

La méthode a été testée sur trois produits de consommation — ordinateur portable, voiture particulière et réfrigérateur — et quatre matériaux — cuivre, aluminium, tantale et plastique (29 types). Les estimations ont été comparées à des valeurs de référence issues

d’analyses physiques (démontage, analyse chimique) publiées dans la littérature.

Le meilleur résultat est obtenu avec l’algorithme *supply array* appliqué au modèle *consequential* d’ecoinvent :

- **Erreur relative moyenne** : 26 % ;
- **Erreur absolue moyenne** : 1,1 point de pourcentage.

Pour interpréter ces chiffres : si le cuivre représente réellement 3 % de la masse d’un ordinateur portable, la méthode estime entre environ 2,2 % et 3,8 %. L’erreur absolue est faible parce que les fractions massiques sont elles-mêmes petites.

Les auteurs soulignent une limitation qui, dans le contexte de FabNum, constitue plutôt une confirmation : la méthode « does not allow us to distinguish between the variety of models and brands of the same type of product in the real world » (AMATUNI et al. 2024, section 6). Autrement dit, la base ecoinvent elle-même opère par archétypes : un « ordinateur portable » y désigne une catégorie générique, pas un modèle spécifique.

3 Stabilité de la composition intra-catégorie

L’erreur de 26 % mesure la distance entre une estimation générique et une valeur de référence. Mais cette erreur n’a de sens que si la composition est effectivement stable au sein d’une catégorie de produits. Trois études indépendantes le confirment.

3.1 Démontage de 95 produits sur 25 catégories

BABBITT et al. (2020) ont physiquement démonté 95 produits électroniques couvrant 25 catégories (smartphones, ordinateurs portables, tablettes, téléviseurs, consoles, imprimantes...), fabriqués entre 1990 et 2016. Leurs résultats montrent que :

- la variance interne de mesure est de **0,5 % en moyenne** (maximum 2,5 %) entre pesée pré- et post-démontage ;
- la comparaison inter-études donne des écarts de **0,8 % à 1,7 %** sur la masse totale ;
- pour les technologies matures, « the overall material composition has remained relatively constant over time, particularly once a specific design and form factor is established in the market ».

3.2 Ordinateurs portables sur une décennie

KASULAITIS et al. (2015) ont modélisé les matériaux et attributs de onze ordinateurs portables couvrant dix années de production. Ils observent une *faible variabilité* de la taille, de la composition matérielle et de la masse des composants au fil du temps.

3.3 Smartphones sur vingt ans

Dans le cas des smartphones, la structure générale est identique d'un appareil à l'autre, bien que la concentration de certains matériaux évolue (augmentation de l'aluminium, diminution des métaux précieux). BOOKHAGEN et al. (2020) ont analysé 53 éléments métalliques dans des smartphones, établissant un profil de composition métallique détaillé qui caractérise cette catégorie de produits dans son ensemble.

4 Incertitude en contexte : cadre de référence

4.1 Incertitude intrinsèque d'un produit spécifique

TEEHAN et KANDLIKAR (2013) ont démonté onze produits informatiques — dont un serveur rack, des ordinateurs de bureau et portables de différents facteurs de forme, un iPad, un Kindle et un commutateur réseau — et cartographié leurs nomenclatures complètes sur la base ecoinvent v2.2. L'analyse Monte Carlo donne des écarts-types de **10 à 18 %** des moyennes.

Ce résultat est fondamental : même pour un produit *spécifique* démonté et pesé, l'incertitude du mapping vers ecoinvent est déjà de 10 à 18 %. L'approche générique d'Amatuni ajoute donc environ 8 à 16 points de pourcentage d'incertitude supplémentaire en passant du produit spécifique à la catégorie — un surcoût modeste.

4.2 Échelle de référence en analyse de flux de matières

LANER et al. (2014) proposent un cadre systématique pour l'incertitude en analyse de flux de matières (MFA). Ils graduent le coefficient de variation en trois niveaux :

- 10 % — niveau faible ;
- 20 % — niveau moyen ;
- 30 % — niveau élevé.

Les 26 % d'Amatuni se situent dans la fourchette « moyen à élevé », ce qui correspond au niveau standard d'une MFA basée sur des données génériques. Ce n'est pas un résultat dégradé ; c'est le niveau attendu pour ce type d'approche.

5 Convergence oligopolistique upstream

La stabilité intra-catégorie s'explique par la structure de la chaîne d'approvisionnement des équipements numériques. À mesure que l'on remonte de l'assemblage final vers les composants puis les minéraux, la diversité des fournisseurs se réduit jusqu'à la convergence.

5.1 Assemblage : divergence marginale

Les fabricants d'équipements (Dell, HP, Lenovo, Apple) sous-traitent l'assemblage aux mêmes ODM (Foxconn, Quanta, Wistron, Flex). Les mêmes usines assemblent pour plusieurs marques, ce qui limite la différenciation matérielle au dernier maillon de la chaîne.

5.2 Composants : convergence oligopolistique

Les composants critiques proviennent d'oligopoles étroits :

TABLE 1 : Concentration des fabricants de composants clés.

Composant	Principaux fabricants	Part cumulée
CPU x86	Intel, AMD via TSMC	$\approx 100\%$
RAM DDR	Samsung, SK Hynix, Micron	94 %
NAND (SSD)	Samsung, SK Hynix, Kioxia, Micron, WD	$\approx 100\%$
Écrans OLED	Samsung Display, LG Display	$> 90\%$
Puces ARM	TSMC (fonderie principale)	$> 90\%$
Alimentation	Delta Electronics, Lite-On	majoritaire
Connectique	Amphenol, TE Connectivity, Molex	majoritaire

Lorsque trois acteurs détiennent 94 % du marché de la RAM, le choix de la marque du produit final ne peut pas engendrer plus de 6 % de différence dans le profil d'approvisionnement — bien en dessous des 26 % d'incertitude de la méthode générique.

5.3 Minéraux : convergence par construction

Samsung, SK Hynix et Micron s'approvisionnent aux mêmes raffineries, qui s'approvisionnent aux mêmes mines. Les sources minérales sont identiques quelle que soit la marque : cobalt (RDC 73 %), lithium (Australie 47 %), silicium haute pureté (Spruce Pine, États-Unis), tantale (RDC 33 %), terres rares (Chine 60 %).

5.4 Critère formel de suffisance

La catégorisation par famille de produits est suffisante si la variance intra-catégorie (entre marques) est inférieure à l'incertitude de la méthode générique ($\approx 26\%$). La concentration oligopolistique des composants impose une convergence upstream qui rend la distinction par marque non significative : la variance intra-catégorie mesurée (0,5 à 2,5 % selon BABBITT et al. (2020)) est d'un ordre de grandeur inférieure au seuil de 26 %.

6 Vérification par famille de la taxonomie FabNum

6.1 Produits finaux

Le tableau 2 évalue la couverture de chaque famille de produits finaux de FabNum par la littérature.

TABLE 2 : Couverture bibliographique des familles de produits finaux.

Famille	Couverture	Justification
Serveur	Forte	Serveur rack démonté par TEEHAN et KANDLIKAR (2013). Mêmes composants que les postes de travail (CPU x86, RAM, SSD/HDD, PCB, alimentation).
Ordinateur portable	Forte	Catégorie la mieux documentée : AMATUNI et al. (2024) (26 %), KASULAITIS et al. (2015) (11 laptops/10 ans), BABBITT et al. (2020).
Ordinateur de bureau	Forte	Deux facteurs de forme démontés par TEEHAN et KANDLIKAR (2013). Sous-ensemble des composants du serveur.
Smartphone	Forte	Profils matériaux de 10 matériaux prioritaires (FAIRPHONE 2017), 53 éléments métalliques (BOOKHAGEN et al. 2020), 95 produits (BABBITT et al. 2020).
Tablette	Forte	Tablette démontée dans BABBITT et al. (2020). Composition intermédiaire entre smartphone et ordinateur portable.
Station de travail	Moyenne	Pas d'étude dédiée. Ordinateur portable haute performance : mêmes composants, même convergence.
Télévision / écran	Forte	Écrans WEEE étudiés par HORTA ARDUIN et al. (2020). FabNum distingue déjà LCD et OLED au niveau composant.
Imprimante	Moyenne	Pas de nomenclature détaillée publiée. Structure simple : PCB, mécanique, plastique.

Suite page suivante

Famille	Couverture	Justification
Matériel réseau	Moyenne	Commutateur réseau démonté par TEEHAN et KANDLIKAR (2013). PCB + alimentation + boîtier.
Stockage	Forte	HDD et SSD ont des profils radicalement différents (terres rares vs aucune). FabNum les sépare au niveau composant.
IoT / Wearables	Faible	Pas d'étude de nomenclature académique dédiée. Composants identiques au smartphone en miniature.
Casques VR	Faible	Pas de nomenclature publiée. Composition : écrans + processeur + capteurs + batterie + optique.
Matériel dédié IA	Faible	Catégorie récente. GPU et TPU fabriqués par les mêmes fonderies (TSMC, Samsung).

Bilan : 8 familles sur 13 bénéficient d'une couverture forte, 3 d'une couverture moyenne (composants sous-jacents documentés), et 2 d'une couverture faible (catégories récentes ou de niche dont les composants fondamentaux sont néanmoins les mêmes que dans les catégories documentées).

6.2 Composants

Le tableau 3 évalue la couverture des familles de composants.

TABLE 3 : Couverture bibliographique des familles de composants.

Famille	Couverture	Justification
Processeur x86	Forte	Duopole Intel / AMD via TSMC. Silicium haute pureté (99,9999999 %), interconnexions en cuivre universelles. Variance inter-marque nulle sur les matériaux critiques.
Processeur ARM	Forte	TSMC fabrique plus de 90 % des puces ARM haut de gamme. Même procédé de fabrication que les processeurs x86 avancés.

Suite page suivante

Famille	Couverture	Justification
Processeur ASIC	Moyenne	Mêmes fonderies. Conception différente mais matériaux identiques.
Mémoire RAM	Forte	Samsung (43 %), SK Hynix (28 %), Micron (23 %) = 94 %. Composition DRAM documentée ($\approx 1\,000$ ppm Au, $\approx 200\,000$ ppm Cu).
SSD (2.5 et M.2)	Forte	NAND Flash produit par cinq fabricants (Samsung, SK Hynix, Kioxia, Micron, WD). Pas de terres rares.
Stockage eMMC/UFS	Moyenne	Sous-ensemble NAND en conditionnement différent. Mêmes fabricants.
Disque dur	Forte	Aimants NdFeB documentés (21,5 % wt Nd, 65,1 % wt Fe). Profil distinct du SSD — distinction correcte dans FabNum.
Écran LCD-TFT	Forte	ITO (oxyde d'indium-étain) universel. Trois à quatre fabricants de dalles (BOE, LG Display, AU Optronics).
Écran OLED	Forte	Samsung Display domine les smartphones, LG Display les grands formats. Couches organiques + ITO. Profil distinct du LCD.
Écran mini/micro LED	Faible	Technologie émergente. Matériaux de base : GaN sur saphir, identiques aux LED classiques.
Batterie	Forte (nuance)	Chimie de cathode variable : NMC (Ni, Mn, Co), LFP (Fe, P), LCO (Co). L'anode (graphite) est universelle. Voir section 6.3.
Carte mère (PCB)	Forte	FR-4 (fibre de verre 29 %, résine époxy 26 %, cuivre 32 %). Cuivre ≈ 20 % wt, or $\approx 0,04$ % wt. Standard industriel.
Connecteurs	Forte	Oligopole Amphenol, TE Connectivity, Molex. Cuivre + placage or.
Connectivité	Moyenne	Modules WiFi/Bluetooth/5G = puces sur PCB. Mêmes fonderies (Qualcomm, Broadcom via TSMC).
Audio	Moyenne	Haut-parleurs = aimants NdFeB (comme les HDD). Microphones MEMS = silicium.

Suite page suivante

Famille	Couverture	Justification
Caméra	Moyenne	Capteur CMOS (Sony $\approx 50\%$, Samsung $\approx 20\%$) + optique (verre, plastique).
Capteurs	Moyenne	MEMS = silicium + piézoélectriques. Quelques fabricants (Bosch, STMicroelectronics).
Boîtier	Moyenne	Aluminium, acier ou plastique selon le produit. Matériau variable mais simple, sans matériaux critiques significatifs.

Bilan : 12 familles sur 20 ont une couverture forte, 7 une couverture moyenne (composants sous-jacents documentés), et 1 une couverture faible (micro-LED, technologie émergente).

6.3 Point de vigilance : les batteries

La batterie est le seul composant dont la chimie de cathode modifie radicalement le profil en matériaux critiques :

TABLE 4 : Profil matériaux critiques selon la chimie de cathode.

Chimie	Cobalt	Nickel	Lithium
NMC (Ni-Mn-Co)	présent (variable selon ratio)	présent	présent
LCO (Li-Co)	dominant	absent	présent
LFP (Li-Fe-P)	absent	absent	présent

Pour un indice de risque d’approvisionnement, la distinction est significative : le cobalt provient à 73 % de la RDC, ce qui crée un risque géopolitique considérable pour les chimies NMC et LCO mais pas pour LFP. Si FabNum utilise un profil batterie unique, il est recommandé de distinguer au minimum les deux grandes familles (avec cobalt / sans cobalt) ou d’utiliser une pondération reflétant la répartition du marché.

7 Synthèse

L’approche par familles génériques est validée par la littérature pour la quasi-totalité de la taxonomie FabNum. Trois arguments convergents soutiennent cette conclusion.

1. **La méthode générique fonctionne** : 26 % d’erreur relative et 1,1 point d’erreur absolue (AMATUNI et al. 2024), un niveau standard pour une analyse de flux de matières basée sur des données génériques (LANER et al. 2014).

2. **La composition est stable intra-catégorie** : variance mesurée de 0,5 à 2,5 % entre produits d’une même catégorie, y compris sur 25 ans de production (BABBITT et al. 2020 ; KASULAITIS et al. 2015).
3. **L’incertitude ajoutée est marginale** : passer du produit spécifique (10 à 18 % d’incertitude intrinsèque selon TEEHAN et KANDLIKAR (2013)) au profil générique (26 %) ajoute environ 8 à 16 points de pourcentage — bien en dessous du seuil où la distinction par marque deviendrait significative, puisque la concentration oligopolistique des composants limite la variance inter-marque à moins de 6 % pour les matériaux dominants.

Le seul point de vigilance identifié concerne les batteries, dont la chimie de cathode modifie substantiellement le profil en matériaux critiques. Pour tous les autres composants et produits, la convergence oligopolistique upstream garantit que la distinction par marque ou modèle n’apporte pas de précision utile au regard de l’incertitude inhérente à la méthode.

Références

- AMATUNI, Levon et al. (2024). « Deriving material composition of products using life cycle inventory databases ». In : *Journal of Industrial Ecology* 28.5, p. 1060-1072. DOI : [10.1111/jiec.13538](https://doi.org/10.1111/jiec.13538).
- BABBITT, Callie W. et al. (2020). « Disassembly-based bill of materials data for consumer electronic products ». In : *Scientific Data* 7, p. 251. DOI : [10.1038/s41597-020-0573-9](https://doi.org/10.1038/s41597-020-0573-9).
- BOOKHAGEN, Britta et al. (2020). « Metallic resources in smartphones ». In : *Resources Policy* 68, p. 101750. DOI : [10.1016/j.resourpol.2020.101750](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101750).
- FAIRPHONE (2017). *Smartphone Material Profiles*. URL : https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2017/05/SmartphoneMaterialProfiles_May2017.pdf.
- HORTA ARDUIN, Rachel et al. (2020). « Novel indicators to better monitor the collection and recovery of (critical) raw materials in WEEE : Focus on screens ». In : *Resources, Conservation and Recycling* 157, p. 104772. DOI : [10.1016/j.resconrec.2020.104772](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104772).
- KASULAITIS, Barbara V. et al. (2015). « Evolving materials, attributes, and functionality in consumer electronics : Case study of laptop computers ». In : *Resources, Conservation and Recycling* 100, p. 1-10. DOI : [10.1016/j.resconrec.2015.01.009](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.01.009).
- LANER, David, Helmut RECHBERGER et Thomas ASTRUP (2014). « Systematic evaluation of uncertainty in material flow analysis ». In : *Journal of Industrial Ecology* 18.6, p. 859-870. DOI : [10.1111/jiec.12143](https://doi.org/10.1111/jiec.12143).
- TEEHAN, Paul et Milind KANDLIKAR (2013). « Comparing embodied greenhouse gas emissions of modern computing and electronics products ». In : *Environmental Science & Technology* 47.9, p. 3997-4003. DOI : [10.1021/es303012r](https://doi.org/10.1021/es303012r).