

BESOINS EN METAUX DANS LE SECTEUR NUMERIQUE



EXPERTISES

RAPPORT FINAL

Octobre 2024

REMERCIEMENTS

Maxime LAZARD (A3M)
Hélène BORTOLI-PUIG (ADEME)
Julien DEZOMBRE (ADEME)
Erwann FANGEAT (ADEME) – Coordination
de l'étude
Raphaël GUASTAVI (ADEME)
Agathe JARRY (ADEME)
Olga KERGARAVAT (ADEME) –
Coordination de l'étude
Bruno LAFITTE (ADEME)
Tom NICO (ARCEP)
Anne YVRANDE-BILLON (ARCEP)
Philippe BIHOUIX (AREP)
Gaétan LEFEBVRE (OFREMI)
Patrick d'HUGUES (BRGM)
Léa DI CIOCCIO (CEA-Leti)

Claire DORVILLE (CGDD)
Mouna TATOU-BRETON (DGALN /
Ministère de la Transition Ecologique)
Mélanie LE DAIN (DGE)
Elodie MAXIME-LECLEIRE (DGE)
Xavier LANTOINETTE (ecosystem)
Alice BIZOUARD (ecosystem)
Bertrand REYGNER (Ecologic)
Victor FRANÇOIS (Ecologic)
Gauthier ROUSSILHE (Expert indépendant)
Anne FAURE (France Stratégie)
Emmanuel HACHE (IFPEN)
Liliane DEDRYVER (IGN)
Benjamin NINASSI (INRIA)
Jérôme DE MURCIA (Orange)
Hugues FERREBOEUF (The Shift Project)

CITATION DE CE RAPPORT

Louis OLLION (Deloitte), Pierrick DRAPEAU (Deloitte), Lena BOZTEPE (Deloitte), Solène DE VILLERS (Deloitte), Guillaume BOUYER (Deloitte), Luca VERGARI (Deloitte), Erwann FANGEAT (ADEME), Olga KERGARAVAT (ADEME). 2024. Etude des besoins en métaux dans le secteur numérique. 138 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2022AC000136

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Deloitte Conseil

Coordination technique :

- KERGARAVAT Olga - Direction/Service : DEC/SER
- FANGEAT Erwann - Direction/Service : DEC/So Num

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	11
SIGLES ET ACRONYMES	13
1. INTRODUCTION	14
1.1. Contexte et enjeux de l'étude	14
1.1.1. Enjeux environnementaux des activités extractives.....	16
1.1.1.1. Analyses quantitatives des enjeux environnementaux liés à l'extraction des métaux	16
1.1.1.2. Principaux risques environnementaux à chaque étape de traitement des métaux	18
1.1.2. Enjeux sociaux des activités extractives.....	21
1.1.3. Enjeux de souveraineté et de criticité des activités extractives	22
1.1.3.1. Enjeux liés aux ruptures d'approvisionnement en métaux critiques et stratégiques	22
1.1.3.2. Enjeux liés aux liens entre prix des métaux, prix des composants et prix des équipements numériques	24
1.1.4. Résumé des enjeux liés à l'extraction des métaux.....	25
1.2. Objectifs de l'étude	26
1.3. Périmètre de l'étude	26
2. METHODOLOGIE	30
2.1. Rédaction des fiches métaux et indicateurs sélectionnés	30
2.1.1. Données générales et cartographie de la chaîne de valeur.....	30
2.1.2. Enjeux de marché et évaluation de la criticité	33
2.1.3. Historique des prix et de la demande en France et dans l'UE.....	34
2.1.4. Pratiques de recyclage en France.....	34
2.2. Rédaction des fiches équipements	34
2.2.1. Données générales.....	34
2.2.2. Données de composition matière utilisées.....	35
2.2.3. Méthode de calcul du gisement disponible au recyclage en fin de vie.....	36
2.2.4. Etat des lieux des freins au recyclage des métaux contenus dans l'équipement en fin de vie	37
2.3. Analyse prospective à 2030 et 2050	37
2.3.1. Scénarios intégrés à la modélisation prospective.....	37
2.3.2. Evolution du nombre d'équipements d'ici à 2030 et 2050	38
2.3.3. Evolution des compositions métalliques unitaires des équipements et variables associées	38
3. METAUX ET NUMERIQUE	40
3.1. Utilisation des métaux dans le secteur numérique	40
3.1.1. Caractéristiques des métaux.....	40
3.1.2. Utilisation des métaux dans les différents composants des équipements numériques	42
3.1.3. Part du numérique dans les secteurs utilisateurs des métaux de l'étude	45
3.1.4. Principales tendances affectant le besoin en métaux du secteur du numérique.....	46
3.2. Cartographie de la chaîne de valeur des métaux	47

3.2.1.	Étapes de transformation considérées	47
3.2.1.1.	Matière première	47
3.2.1.2.	Matériau transformé	49
3.2.1.3.	Composant	49
3.2.1.4.	Assemblage	49
3.2.1.5.	Équipement	49
3.2.2.	Constats issus de la cartographie des chaînes de valeur et concentration de la production.....	50
3.3.	Evaluation de la criticité des métaux du périmètre d'étude	52
3.3.1.	Classement des métaux en termes de criticité.....	52
3.3.2.	Mise en perspective des risques socio-environnementaux identifiés.....	53
3.3.3.	Mise en perspective des risques géo-économiques identifiés	55
4.	FIN DE VIE DES EQUIPEMENTS DU SECTEUR NUMERIQUE	57
4.1.	Fin de vie des DEEE en France.....	57
4.1.1.	Collecte	57
4.1.1.1.	Principaux canaux de collecte des EEE en France.....	57
4.1.1.2.	Typologie d'équipements collectés en France.....	58
4.1.1.3.	Taux de collecte des DEEE par rapport aux mises sur le marché et au gisement de DEEE	59
4.1.2.	Tri.....	60
4.1.2.1.	Réemploi ou réutilisation	60
4.1.2.2.	Recyclage des DEEE.....	61
4.1.3.	Valorisation en recyclage.....	65
4.1.3.1.	Types de destinations des équipements numériques en fin de vie	65
4.1.3.2.	Récupération des métaux du périmètre de l'étude dans les composants des DEEE collectés	67
4.1.3.3.	Acteurs de la valorisation des métaux en recyclage (ou «récupération des métaux»).....	73
4.2.	Freins à la valorisation en recyclage des métaux issus des (D)EEE.....	74
4.2.1.	Freins liés aux politiques publiques et au fonctionnement de la filière REP.....	75
4.2.1.1.	Incertitude sur le recyclage réel des métaux et le niveau de granularité des données	75
4.2.1.2.	Freins liés à la collecte et à l'export de DEEE et de composants de DEEE vers des pays hors UE.....	76
4.2.1.3.	Freins liés à la thésaurisation et à l'hibernation des DEEE	76
4.2.2.	Freins liés au tri des DEEE et à l'extraction des composants pour recyclage.....	77
4.2.2.1.	Difficultés rencontrées dans la filière pour le réemploi et la réutilisation des équipements numériques	77
4.2.2.2.	Effets du reconditionnement sur la disponibilité en recyclage des métaux issus des équipements numériques	79
4.2.2.3.	Complexité du traitement de certains DEEE et de la récupération de certains composants	79
4.2.3.	Freins liés à la valorisation en recyclage.....	81
4.2.3.1.	Conflits de récupération entre métaux	81
4.2.3.2.	Efficacité de tri améliorable et obstacles à la pureté des métaux récupérés	83
4.2.3.3.	Faible rentabilité économique de l'extraction de certains métaux du périmètre de l'étude	84
4.3.	Récapitulatif des niveaux de recyclage des 25 métaux du périmètre de l'étude	87

5.	RESULTATS DE L'ANALYSE PROSPECTIVE A 2030 ET 2050.....	88
5.1.	Résultats et enseignements de la modélisation à 2030 et 2050.....	88
5.1.1.	Présentation des scénarios et des variables utilisés dans l'analyse prospective.....	88
5.1.1.1.	Rappel des scénarios prospectifs Transition(s) 2050.....	88
5.1.1.2.	Présentation des dix variables « Métaux et numérique » d'ici à 2030 et 2050.....	89
5.1.2.	Résultats de la modélisation à 2030/2050.....	94
5.1.2.1.	Hypothèses de l'analyse prospective – Nombre et types d'équipements en 2030 et en 2050	94
5.1.2.2.	Résultats de l'analyse prospective – Quantités de métaux utilisés.....	97
5.1.3.	Principaux enseignements de l'analyse prospective	100
5.1.3.1.	Enseignements sur le nombre et les types d'équipements en 2030 et en 2050.....	100
5.1.3.2.	Enseignements généraux sur les quantités de métaux du parc d'équipements numériques d'ici à 2050	101
5.1.3.3.	Principaux enseignements sur les métaux connaissant les plus fortes hausses d'utilisation par le secteur numérique d'ici à 2050.....	102
5.2.	Résultats de l'atelier collaboratif avec les membres du Comité de Pilotage	110
5.2.1.	Objectifs de l'atelier collaboratif « Métaux et numérique en 2050 ».....	110
5.2.2.	Implications des quatre scénarios Transition(s) 2050 sur les chaînes de valeurs des métaux du secteur du numérique	110
5.2.3.	Principaux risques socio-environnementaux et géo-économiques à l'horizon 2050 pour les filières d'approvisionnement en métaux.....	112
6.	CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	114
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	115
	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	120
7.	ANNEXES	123
7.1.	Annexe : Symboles utilisés pour les éléments chimiques	123
7.2.	Annexe : Contexte réglementaire de la fin de vie des équipements numériques ...	123
7.2.1.	Cadre réglementaire européen	123
7.2.1.1.	Règlementation relative aux DEEE	123
7.2.1.2.	Règlementation relative aux substances dangereuses et effet sur la fin de vie des DEEE	125
7.2.1.3.	Règlementation relative aux batteries	126
7.2.1.4.	Politiques publiques relatives aux matières premières critiques	127
7.2.2.	Cadre réglementaire français	128
7.2.2.1.	La filière REP DEEE est la consécration en France de la réglementation européenne sur les DEEE	128
7.2.2.2.	La France s'est dotée de réglementations sur la réutilisation et le réemploi des DEEE du secteur du numérique	129
7.3.	Annexe : Flux de déchets en fin de vie des DEEE	130
7.4.	Annexe : Chaîne de valeur du recyclage des piles et accumulateurs en France.....	133
7.5.	Annexe : Résultats additionnels de l'analyse prospective à 2050.....	134
7.5.1.	Annexe : Disponibilité des données de composition métallique	134
7.5.2.	Annexe : Evolution des quantités de métaux utilisés selon différents niveaux de substitution pour chaque variable.....	136
7.5.3.	Annexe : Analyse croisée des taux de croissance et de la criticité des métaux (réserves et disponibilité).....	138

RÉSUMÉ

L'étude ADEME/Arcep « Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective » (2022) a identifié la consommation de matière dans la production d'équipements numériques a été identifiée comme l'un des enjeux majeurs de l'empreinte environnementale du secteur, aux côtés des impacts sur le changement climatique. **L'utilisation par ce secteur de métaux très divers, combinée à la hausse constatée et attendue de la consommation d'équipements numériques** en France et dans le monde fait par ailleurs l'objet d'alertes régulières par les experts de la question de l'empreinte environnementale du secteur numérique (par ex. Bordage, 2019).

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude intitulée « **Besoins en métaux dans le secteur numérique** ». Elle couvre une sélection de **20 équipements du numérique** modélisés dans l'étude ADEME/Arcep mentionnée *supra*: **terminaux** fixes et mobiles, biens d'équipements **réseau** et équipements utilisés en **centres de données**. Une recherche bibliographique et une série d'entretiens ont permis d'établir la composition matière de ces équipements pour une sélection de **25 métaux**. La présente étude cartographie également les chaînes de valeur amont de ces métaux utilisés dans les équipements du secteur numérique, ainsi que leur devenir en fin de vie des équipements (collecte, tri, recyclage) en aval des chaînes de valeur. Enfin, une analyse prospective évalue la quantité de métaux utilisées dans le secteur numérique en France aux horizons 2030 et 2050, établie à partir des analyses prospectives de l'étude ADEME/Arcep mentionnée précédemment.

Les informations spécifiques aux métaux d'un part, et aux équipements d'autre part, sont présentées dans un jeu de fiches annexées au présent rapport. Ce rapport présente le contexte de l'étude – section 1, la méthodologie sélectionnée pour établir les informations des fiches – section 2, et une analyse d'ensemble des résultats de l'étude (utilisation des métaux dans le secteur numérique – section 3, devenir des métaux en fin de vie des équipements, analyse prospective – section 4).

Ces travaux permettent d'aboutir aux constats suivants :

1) **La composition en métaux des équipements et de leurs chaînes de valeur, tant en amont qu'en aval (collecte et recyclage), sont marqués par une grande opacité.** En effet, les données de composition matière sont le plus souvent lacunaires, en particulier du fait de leur **caractère sensible** (avantages technologiques et de marché, propriété intellectuelle, etc.), mais également de leur **obsolescence rapide dans un contexte d'évolution fréquente des technologies**. Sur certains terminaux en particulier (ex. télévisions), l'absence de données a été aggravée par la **difficulté d'interroger des experts en France**, compte tenu de la localisation des chaînes de valeur de production de ces terminaux, pour l'essentiel situés en dehors de l'UE. La complexité de la composition des équipements et des chaînes de valeur de production a en général rendu difficile la collecte de données permettant de tracer les chaînes de valeur amont à chacune de leurs étapes. La quasi-absence de réglementation sur le recyclage des différents métaux issus des DEEE a également complexifié **l'accès aux informations relatives à la fin de vie des différents métaux**, faute de collecte standardisée et de données relatives aux métaux.

2) L'étude montre ainsi qu'**il existe une forte dépendance de la consommation de métaux dans les équipements numériques au volume anticipé de ces équipements**, et donc des choix technologiques et sociétaux d'aujourd'hui pour notre environnement numérique de demain, par exemple le déploiement de l'internet des objets – IoT - ou de la 5G. **Le gallium, l'yttrium, le manganèse, le germanium et l'or pourraient ainsi connaître une hausse de consommation particulièrement forte d'ici 2050 (scénario tendanciel)**: à l'exception de l'or, la hausse importante de la consommation de tous ces métaux est liée au **déploiement de la 5G** et aux

équipements réseau associés (stations de base)¹. Il convient de noter que des membres du COPIL de l'étude ne soutiennent pas les hypothèses de déploiement 5G retenues dans la modélisation. Ces hypothèses n'ont pas été modifiées cependant, afin d'assurer la complémentarité de cette étude avec celle relative à l'« Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective » (ADEME/Arcep, 2022).

Dans le détail, on rappellera que l'or est utilisé dans la plupart des équipements, en particulier dans les composants électroniques ayant une fonction logique. La hausse de la consommation d'or est notamment portée, dans notre modèle, par le déploiement important d'équipements IoT d'ici 2050. Ce scénario pourrait être amené à évoluer si la tendance des fabricants à remplacer ce métal coûteux se poursuit. On notera également que si le gallium, l'yttrium, le manganèse, le germanium et l'or représentent des hausses importantes, ils ne sont pas les plus consommés par les équipements numériques en volume (de l'ordre de 10 à 100 tonnes dans le parc en 2050), contrairement au cuivre, à l'aluminium ou au silicium par exemple, dont les quantités présentes dans le parc français sont environ 100 fois (Si) à 1000 fois supérieures (Cu, Al).

Ces résultats sont à rapprocher de la part du secteur numérique dans l'utilisation des métaux. Si les équipements numériques consomment une majeure partie de la production totale de certains métaux (Ga, Ge, In en particulier), les métaux les plus consommés en volume par les équipements (Al, Cu) sont utilisés dans de nombreux secteurs de l'économie, et le numérique consomme une part minoritaire de ces grands métaux.

3) **La cartographie des chaînes de valeur des métaux utilisés dans les équipements montre la forte concentration des activités d'extraction dans certains pays, en particulier la Chine :**

en effet, **la Chine est le premier producteur mondial de 15 des 25 métaux considérés dans l'étude, et en situation de quasi-monopole pour 7 d'entre eux** : dysprosium, gallium, germanium, néodyme, praséodyme, tungstène, yttrium². Les étapes de transformation aval de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le secteur numérique sont également mondialisées mais leur degré de concentration n'a en revanche pas été quantifié **compte tenu du peu de transparence de ces chaînes de valeur** (cf. notre premier constat). **Les entretiens font néanmoins ressortir que les équipements sont plutôt produits en Asie.** Ils révèlent également que l'enjeu de souveraineté de la localisation des chaînes de valeur est autant lié à l'extraction des métaux qu'au **développement de capacités d'affinage des métaux**. Avant leur intégration dans des composants, les métaux utilisés dans les équipements du secteur numérique sont affinés à un **degré de pureté très élevé, par des procédés spécifiques dont les coûts d'investissement sont élevés**. Cette étape de la chaîne de valeur n'est pas toujours située en France et dans l'UE. Les entretiens ont enfin permis d'établir que si les fabricants d'équipements numériques peuvent être affectés par des ruptures d'approvisionnement à court terme, ils sont moins sensibles à des hausses de prix à moyen et long terme. En effet, les métaux ne constituent généralement pas le principal poste de coût de production des équipements numériques (impact prix faible) tandis que les fabricants de composants et d'équipements ont la capacité d'absorber les hausses de coûts.

4) **L'étain, l'argent, le ruthénium, le nickel et l'antimoine sont jugés comme particulièrement critiques, compte tenu de la convergence de risques sociaux, environnementaux ou encore géopolitiques**

L'évaluation quantifiée de la criticité des métaux s'est appuyée sur six critères : la disponibilité pour répondre à la demande future à 2030, les impacts sociaux le risque sur la longévité des réserves connues, les incertitudes sur la disponibilité du métal, les risques géopolitiques de l'approvisionnement, la volatilité du prix du métal, l'impact environnemental de l'extraction et l'impact sociétal de l'extraction. **L'évaluation de la criticité fait ressortir cinq métaux (Sn, Ag, Ru, Ni, Sb), pour lesquels les TIC représentent respectivement 38 %, 16 %, 36 %, 1 % et 25 % des usages.**

¹ Bien que ces métaux soient utilisés dans plusieurs équipements numériques, les stations de base pourraient représenter une forte majorité de leurs usages dans le secteur numérique d'ici à 2050.

² L'Afrique du Sud a un quasi-monopole sur l'extraction de platine et ruthénium, et la RDC sur le cobalt.

Cette quantification révèle par ailleurs que les métaux dont l'impact environnemental est le plus important sont également ceux dont les prix sont relativement élevés : métaux précieux (Au, Ag) ou platinoïdes (Pt, Pd, Ru). Cette évaluation de criticité comporte certaines limites méthodologiques : elle agrège des indicateurs issus de différentes sources, et ces indicateurs - par exemple l'IDH du pays d'extraction - ne révèlent qu'en partie les impacts sociaux et environnementaux spécifiques de la production des métaux compris dans le périmètre d'étude.

5) **Le recyclage des métaux du périmètre d'étude issus de déchets d'équipements numériques (DEEE) se limite généralement à quelques métaux dont le prix justifie cette opération (par ex. Au, Ag, Cu, Pt).** Pour la moitié des métaux étudiés, la présente étude montre qu'il n'existe pas de filière de recyclage à échelle industrielle en France et dans l'UE. La récupération du métal dépend de la fraction – ou type de composant – dans laquelle il est contenu. Ces métaux sont récupérés par un faible nombre d'acteur, au niveau européen, traitant généralement d'autres types de matières premières et recourant à certains types de procédés types selon les métaux (pyro-, hydro- et électrometallurgie). **Les filières de collecte et de tri de ces métaux n'ont pas atteint leur plein potentiel, et les composants sont parfois exportés avant la récupération du métal en tant que tel.** Il n'existe pas a priori de limite à l'atteinte d'un niveau de pureté suffisant permettant l'utilisation de métaux recyclés dans de nouveaux équipements numériques, mais le marché des métaux en Europe ne leur justifie pas.

L'ensemble des travaux a finalement permis de nourrir une réflexion prospective avec quelques experts du secteur sur l'impact sur la chaîne de valeur des métaux du périmètre de l'étude des quatre scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME, et sur les risques géo-économiques et socio-environnementaux associés à ces scénarios à horizon 2050. Si la circularité des équipements et métaux contenus est optimisée dans tous les scénarios, il se distinguent par la quantité de ressources nécessaires pour satisfaire la demande en équipements : les scénarios les plus « techno-solutionnistes » impliquent ainsi l'ouverture de nouvelles mines. L'analyse des risques montre elle des problèmes d'acceptabilité et de potentielles crises sociales et économiques pour les scénarios les plus « frugaux » S1 et S2 et, d'autre part, un accroissement des impacts environnementaux et de la dépendance aux Etats non UE pour les scénarios les plus « techno-solutionnistes » S3 et S4.

Dans le cadre de ces travaux, l'ADEME a été accompagnée par un **Comité de pilotage** constitué de représentants des pouvoirs publics, des éco-organismes (Ecosystem et Ecologic), des fédérations professionnelles (comme A3M), mais également de partenaires tels que OFREMI, CEA, BRGM, IFPEN, ARCEP, AREP, INRIA, IGN, The Shift Project, Orange et des experts indépendants spécialisés dans le domaine du numérique.

ABSTRACT

The ADEME/Arcep study 'Evaluation of the environmental impact of digital technology in France and prospective analysis' (2022) identified the consumption of materials in the production of digital equipment as one of the major challenges for the sector's environmental footprint, alongside the impact on climate change. The sector's use of a **wide range of metals**, combined with the **observed and expected increase in the consumption of digital equipment** in France and around the world, is also the subject of regular warnings by experts on the environmental footprint of the digital sector (e.g. Bordage, 2019).

It is against this backdrop that this study entitled '**Metal requirements in the digital sector**' is being carried out. It covers a selection of **20 pieces of digital equipment** modelled in the ADEME/Arcep study mentioned above: fixed and mobile **terminals, network** equipment and equipment used in **data centres**. A literature search and a series of interviews were used to establish the material composition of this equipment for a selection of **25 metals**. This study also maps the upstream value chains of these metals used in digital sector equipment, as well as their fate at the end of equipment life (collection, sorting, recycling) downstream of the value chains. Finally, a prospective analysis assesses the quantity of metals used in the digital sector in France by 2030 and 2050, based on the prospective analyses in the ADEME/Arcep study mentioned above.

Information specific to metals on the one hand, and equipment on the other, is presented in a set of sheets appended to this report. This report presents the background to the study - section 1, the methodology used to compile the information in the sheets - section 2, and an overall analysis of the results of the study (use of metals in the digital sector - section 3, fate of metals at the end of equipment life, and prospective analysis - section 4).

This work has led to the following observations:

1) **The metal composition of equipment and its value chains, both upstream and downstream (collection and recycling), is highly opaque.** Data on material composition is often incomplete, particularly because of its **sensitive nature** (technological and market advantages, intellectual property, etc.), as well as its **rapid obsolescence in a context of frequent technological change**. For some terminals in particular (e.g. televisions), the lack of data was exacerbated by **the difficulty of interviewing experts in France**, given the location of the production value chains for these terminals, which are mainly located outside the EU. The complexity of the composition of the equipment and of the production value chains generally made it difficult to collect data enabling the upstream value chains to be traced at each stage. The virtual absence of regulations on the recycling of different metals from WEEE has also made it **difficult to access information on the end-of-life of different metals**, due to the lack of standardised collection and data on metals.

2) The study shows that **metal consumption in digital equipment is highly dependent on the anticipated volume of this equipment**, and therefore on today's technological and societal choices for tomorrow's digital environment, such as the deployment of the Internet of Things - IoT - or 5G. **Consumption of gallium, yttrium, manganese, germanium and gold could rise particularly sharply between now and 2050 (trend scenario):** with the exception of gold, the significant increase in consumption of all these metals is linked to the **deployment of 5G** and the associated network equipment (base stations). It should be noted that members of the study's COPII do not support the 5G deployment assumptions used in the modelling. These assumptions have not been changed, however, in order to ensure that this study complements the study on the 'Evaluation of the environmental impact of digital technology in France and prospective analysis' (ADEME/Arcep, 2022).

In detail, gold is used in most equipment, particularly electronic components with a logic function. In our model, the increase in gold consumption is driven in particular by the significant deployment of IoT equipment between now and 2050. This scenario could change if the trend by manufacturers to replace this expensive metal continues. It should also be noted that although these five metals represent significant increases, they are not the most consumed by digital equipment in terms of volume (around 10 to 100 tonnes in the installed base in 2050), unlike copper, aluminium or silicon, for example, whose quantities in the French installed base are around 100 times (Si) to 1000 times greater (Cu, Al).

These results should be seen in the context of the digital sector's share of metal use. While digital equipment consumes a major part of the total production of certain metals (Ga, Ge, In in particular), the metals consumed most in volume by equipment (Al, Cu) are used in many sectors of the economy, and the digital sector consumes a minority share of these major metals.

3) **The mapping of value chains for metals used in equipment shows the high concentration of extraction activities in certain countries, particularly China. China is the world's leading producer of 15 of the 25 metals considered in the study, and has a virtual monopoly on 7 of them:** dysprosium, gallium, germanium, neodymium, praseodymium, tungsten and yttrium. The downstream processing stages in the value chain for metals used in the digital sector are also globalised, but their degree of concentration has not been quantified **given the lack of transparency in these value chains** (see our first observation). **The interviews do, however, show that equipment tends to be produced in Asia.** They also reveal that the issue of sovereignty in the location of value chains is as much to do with the extraction of metals as with the **development of metal refining capacity.** Before being incorporated into components, the metals used in digital sector equipment are **refined to a very high degree of purity, using specific processes with high investment costs.** This stage of the value chain is not always located in France or the EU. Lastly, the interviews revealed that while digital equipment manufacturers may be affected by short-term supply disruptions, they are less sensitive to price rises in the medium and long term. This is because metals are generally not the main production cost item for digital equipment (low price impact), while component and equipment manufacturers have the capacity to absorb cost increases.

4) **Tin, silver, ruthenium, nickel and antimony are considered to be particularly critical, given the convergence of social, environmental and geopolitical risks.** The quantified assessment of the criticality of metals was based on six criteria: availability to meet future demand up to 2030, social impacts the risk to the longevity of known reserves, uncertainties over metal availability, geopolitical risks to supply, metal price volatility, the environmental impact of extraction and the societal impact of extraction. **The criticality assessment highlights five metals (Sn, Ag, Ru, Ni, Sb),** for which ICTs account for 38%, 16%, 36%, 1% and 25% of uses respectively. This quantification also reveals that the metals with the greatest environmental impact are also those with relatively high prices: precious metals (Au, Ag) or platinoids (Pt, Pd, Ru). This criticality assessment has certain methodological limitations: it aggregates indicators from different sources, and these indicators - for example, the HDI of the country of extraction - only partially reveal the specific social and environmental impacts of the production of the metals included in the scope of the study.

5) **Recycling of metals from Waste Electronic and Electric Equipment – WEEE - within the scope of the study is generally limited to a few metals whose price justifies this operation (e.g. Au, Ag, Cu, Pt).** For half of the metals studied, this study shows that there are no industrial-scale recycling facilities in France or the EU. Metal recovery depends on the fraction - or type of component - in which it is contained. These metals are recovered by a small number of players at European level, generally processing other types of raw materials and using certain types of process, depending on the metal (pyro-, hydro- and electrometallurgy). **The channels for collecting and sorting these metals have not reached their full potential, and the components are sometimes exported before the metal as such is recovered.** There is no a priori limit to achieving a sufficient level of purity to allow the use of recycled metals in new digital equipment, but the market for metals in Europe does not justify this operation.

Finally, the work as a whole provided the basis for a forward-looking discussion with a number of experts on the impact on the metals value chain of the four ADEME Transition(s) 2050 scenarios within the scope of the study, and on the geo-economic and socio-environmental risks associated with these scenarios up to 2050. While the circularity of the equipment and metals contained is optimised in all the scenarios, they differ in terms of the quantity of resources needed to satisfy the demand for equipment: the most 'techno-solutionist' scenarios involve the opening of new mines. The risk analysis shows problems of acceptability and potential social and economic crises for the most 'frugal' scenarios S1 and S2 and, on the other hand, an increase in environmental impacts and dependence on non-EU countries for the most 'techno-solutionist' scenarios S3 and S4.

As part of this work, ADEME was supported by a Steering Committee made up of representatives of public authorities, eco-organisations (Ecosystem and Ecologic), professional federations (such as A3M), as well as partners such as OFREMI, CEA, BRGM, IFPEN, ARCEP, AREP, INRIA, IGN, The Shift Project, Orange and independent experts specialising in the digital field.

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE METAUX

- **Métaux** : Les métaux sont un ensemble spécifique d'éléments chimiques qui possèdent des caractéristiques identifiées et spécifiques qui les différencient des éléments non métalliques. Ils sont cristallins lorsqu'ils sont solides et sont naturellement présents dans les minéraux. Ils sont souvent de bons conducteurs d'électricité et de la chaleur. Ils sont brillants et malléables. Même s'ils ne sont pas les plus abondants sur Terre, les métaux sont les éléments les plus représentés dans le tableau périodique, avec près de 86 métaux et 7 métalloïdes parmi les 110 éléments dont les propriétés ont été étudiées (IGF, 2023).
- **Minéraux** : Matière naturelle solide et inorganique composée d'un ou de plusieurs éléments chimiques qui présentent une structure cristalline interne spécifique et ordonnée. Les minéraux sont classés selon leur forme, leur structure cristalline et leur composition chimique. Les minéraux sont les éléments constitutifs des roches (IGF, 2023).
- **Minerai** : roche contenant des métaux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable. Une fois extrait, tout minerai nécessite une transformation préalable à une utilisation par l'industrie. La plupart des minerais métallifères sont des oxydes (par ex. l'hématite), des sulfures (par ex. la galène ou la sphalérite), des carbonates (par ex. la malachite ou la sidérite) ou des silicates (par ex. la garniélite) (Drapeau, 2020)
- **Roche** : agrégat d'un ou plusieurs minéraux, homogène ou non. Elle est classée en fonction de son mode de formation (sédimentaire, volcanique ou métamorphique), de sa composition chimique ou minéralogique, ou de ses propriétés mécaniques. Les roches les plus courantes sont le granit, le basalte, le calcaire et le grès.

GLOSSAIRE CIRCUITS ELECTRONIQUES ET CARTES ELECTRONIQUES

- **Carte d'alimentation** : Circuit imprimé chargé de convertir la tension du secteur en différentes tensions compatibles avec les autres circuits électroniques.
- **Carte mère** : Circuit imprimé qui supporte la majorité des composants et connecteurs nécessaires au bon fonctionnement de l'équipement.
- **Carte T-Con** (Timing Control Board) : Le circuit de contrôle de synchronisation est la pièce relayant les informations venant de la carte mère au panneau LCD. Son rôle est d'activer les pixels de l'écran et de cadencer leur fonctionnement.
- **GPU** : « puce » informatique qui effectue des calculs mathématiques rapides, principalement pour le rendu d'images (LeMagIT, 2023).
- **IC** (Integrated Circuits) : Les circuits intégrés, également appelés « Puces » ou « Micro-puces » sont des composants électroniques fabriqués à partir d'un semi-conducteur et composés d'un grand nombre de transistors et d'autres composants électroniques. Ils permettent de produire des fonctions électroniques et sont les composants majoritaires de la plupart des équipements numériques.
- **PCB** (Printed Circuit Board) : Un circuit imprimé est une fine carte en fibre de verre, en époxy composite ou en autre matériau stratifié. Les voies conductrices sont gravées ou « imprimées » sur la carte permettant de connecter différents composants tels que les transistors, les résistances ou les circuits intégrés.
- **PCBA** (Printed Circuit Board Assembly) : Un circuit imprimé assemblé est un PCB sur lequel tous les différents composants ont été montés.
- **SoC** (System-On-Chip) : Un système sur une puce est un système complet embarqué sur un seul circuit intégré (« puce »), pouvant comprendre de la mémoire, un ou plusieurs microprocesseurs, des périphériques d'interface, ou tout autre composant nécessaire à la réalisation de la fonction attendue.
- **Wafer** : Fine tranche d'un matériau semi-conducteur (ex. silicium). Les wafers sont utilisés comme support des circuits intégrés, des transistors et des semi-conducteurs.

GLOSSAIRE TECHNOLOGIES D'ECRAN

- **LED** (Light-Emitting Diode) : Une diode électroluminescente est un composant électronique et optique, qui en étant traversé par du courant électrique, émet une lumière d'une intensité diffuse. Les LED consomment peu d'électricité.
- **LCD** (Liquid Cristal Display) : L'affichage à cristaux liquides fonctionne grâce à des cristaux liquides situés entre deux polarisateurs permettant de contrôler la direction de la lumière provenant du rétro-éclairage. Sans tension électrique, la lumière ne passe pas à travers les cristaux liquides et l'écran reste noir. Lorsque l'électricité est appliquée, les cristaux pivotent et permettent à la lumière de passer, créant ainsi les images à l'écran. En ajustant la tension, la luminosité de chaque partie de l'écran peut varier pour afficher différentes couleurs et images.
- **OLED** (Organic Light-Emitting Diode) : La technologie à Diode Electro-Luminescente Organique est un dispositif d'affichage plus récent que le LCD et permettant des écrans encore plus fins grâce à une couche organique située entre deux électrodes ne nécessitant pas de rétro-éclairage pour fonctionner. Lorsqu'il y a un contact avec de l'électricité, chaque diode peut s'allumer individuellement et produire une vaste gamme de couleurs. Lorsqu'il n'y a pas de charge électrique, les diodes s'éteignent complètement. Certaines diodes pouvant être désactivées lorsque les autres continuent de fonctionner. Ainsi, chaque diode fonctionne comme sa propre source de lumière.
- **QLED** (Quantum Light-Emitting Diode) : La technologie à Diode Electroluminescente à point Quantique est équipée d'une dalle LCD. La lumière nécessaire à l'affichage des images sur l'écran est générée par des LED. Cette lumière est filtrée par une technologie de points quantiques pour obtenir les couleurs de base. En comparaison au dispositif de filtration des couleurs standard présent dans les écrans LCD conventionnels, la technologie QLED propose une meilleure pureté des couleurs.

GLOSSAIRE RESEAUX

- **ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)** : La liaison numérique asymétrique est une technique de communication numérique de la famille xDSL.
- **FTTx** (Fiber To The x) : La fibre est un terme générique désignant toutes les technologies de réseau à bande large utilisant la fibre optique.
- **Modem** (Modulateur-Démodulateur) : Un modem est un composant matériel permettant la connexion au réseau Internet. Il convertit un signal numérique en signal analogique et inversement.
- **Pare-feu** : système de sécurité qui surveille et contrôle le flux de données sur le réseau en fonction d'un ensemble de règles de sécurité.
- **Routeur** : Il permet d'interconnecter deux réseaux. Il reçoit les données transmises sur le réseau et les envoie au modem qui les convertit en signaux analogiques destinés au réseau Internet.
- **Switch** : Il permet de connecter tous les équipements électroniques d'un réseau ensemble afin qu'ils puissent s'échanger des données.
- **xDSL** (x Digital Subscriber Line) : Une ligne d'accès numérique est un terme générique désignant toutes les technologies à haut débit empruntant les lignes de réseau téléphonique classiques en fil de cuivre.

GLOSSAIRE DISPOSITIFS DE STOCKAGE ET COMPOSANTS MEMOIRE

- **(S)DRAM** ([Synchronous] Direct Random Access Memory) : La mémoire à accès aléatoire dynamique est un type de mémoire généralement utilisé pour les données ou le code de programme dont le processeur d'un ordinateur a besoin pour fonctionner. La SDRAM est une mémoire vive dynamique ayant une interface de communication synchrone.
- **HDD** (Hard Disk Drive) : dispositif de stockage de données électromécanique utilisant un stockage magnétique et un ou plusieurs plateaux rigides à rotation rapide recouverts d'un matériau magnétique
- **Mémoire DDR** (Double Data Rate) : La mémoire à double débit de données est une évolution de la mémoire Dynamique à Accès Direct Synchronisé (SRAM) permettant de doubler la bande passante de la mémoire et ainsi de transférer des données deux fois par cycle d'horloge. Ce type de mémoire est donc bien plus rapide.

- **Mémoire Flash NAND** : La mémoire « NOT AND » permanente est une technologie de stockage à base de semi-conducteurs qui ne requiert pas d'alimentation électrique pour conserver les données. Elle est donc dite « non volatile », car contrairement à une mémoire vive (DRAM) les données ne s'effacent pas lorsque l'on cesse d'alimenter la mémoire avec du courant électrique.
- **SSD (Solid State Drive)** : équipement de stockage de données utilisant des assemblages de circuits intégrés pour stocker des données dans des cellules semi-conductrices

GLOSSAIRE AUTRES

- **Edge computing** : serveurs rapprochant le traitement des données de l'utilisateur final. Il permet de réduire la latence, d'améliorer la sécurité et la confidentialité des données ou encore d'alléger les réseaux des transmissions de données vers le cloud (ADEME-Arcep, 2022).
- **EOL-RR (End-Of-Life Recycling Rate)** : Quantité des différents métaux qui sont recyclés au sein de l'Union européenne.
- **HPC** : De l'anglais High Performance Computing, comprend des serveurs équipés d'un nombre conséquent de processeurs pour réaliser une grande quantité de calculs (ADEME-Arcep, 2022)
- **MIPS** : de l'anglais Material Input per Service-unit. L'indicateur MIPS permet de calculer les ressources utilisées pour produire une unité de produit ou de service avec une approche d'analyse de cycle de vie (ADEME-Arcep, 2022)
- **TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)** : ensemble d'outils et de ressources technologiques permettant de transmettre, enregistrer, créer, partager l'information, d'accéder à l'internet (sites Web, logiciels, blogs et messagerie électronique), les technologies (centres de données, serveurs, etc.), les appareils de diffusion en direct (radio, télévision et diffusion sur l'internet) et en différé (podcast, lecteurs audio et vidéo et supports d'enregistrement) et la téléphonie (fixe ou mobile, satellite, visioconférence, etc.)

SIGLES ET ACRONYMES

BGS	British Geological Survey
BRGM	Bureau des Recherches Géologiques et Minières
CE	Commission européenne
CMS	Composant monté en surface
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
EEE	Equipements électriques et électroniques
ESS	Economie sociale et solidaire
GEM F	Gros électro-ménager de froid
GEM HF	Gros électro-ménager hors-froid
JRC	Joint Research Center
Loi AGECE	La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire
MPC	Matières Premières Critiques
P&A	Piles et Accumulateurs
PAM	Petits appareils en mélange (= PEM + PAM IT)
PAM IT	Petits équipements informatiques et de télécommunications (=CAT 06)
PEM	Petits équipements ménagers (=CAT 05)
REP	Responsabilité Élargie des Producteurs
USGS	United States Geological Survey

1. Introduction

1.1. Contexte et enjeux de l'étude

Globalement, le secteur du numérique est en phase de croissance importante, qu'il s'agisse du nombre de terminaux utilisés, de la multiplication des usages, ou de la quantité de données échangées (ADEME ARCEP, 2022) :

- **L'augmentation du nombre d'équipements** par habitant en France. La figure ci-dessous présente l'évolution du taux d'équipement pour certains terminaux du secteur du numérique (en ordonnées) entre 1997 et 2022 (en abscisses) (ARCEP, 2023). Par exemple, une grande majorité de la population s'est équipée en smartphones au cours des dix dernières années : alors que seuls 17 % de la population détenait un smartphone en 2010, ce chiffre a atteint 87 % en 2022 ;
- **Le développement de nouveaux usages du numérique**, marqués notamment par le développement de l'Internet of Things (IoT), augmente la consommation de données liées à des pratiques quotidiennes qui auparavant n'auraient pas nécessité ou bénéficié d'une connexion à Internet (40 % des Français possèdent des objets connectés et 27 % possèdent une enceinte à commande vocale). La nouveauté réside dans l'aspect « connecté » de ces objets, car de nombreux ménages disposaient d'enceintes et d'autres objets avant 2020 (remarque du COPIL) ;

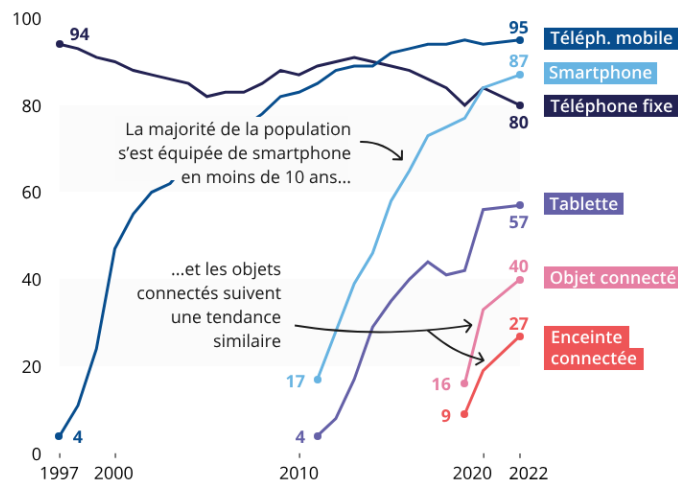


Figure 1 : Evolution du taux d'équipement (%) des répondants au baromètre du numérique 2023 de l'ARCEP (ARCEP, 2023)

- **Des usages du numérique de plus en plus consommateurs de données** (flux de données associés à la vidéo, au développement du cloud gaming, aux usages professionnels, etc.), et le développement des infrastructures permettant ces usages. La Figure 2 montre ainsi l'exemple de la hausse du trafic de données en France depuis 2017, présentant le volume de données consommées sur les réseaux mobiles toutes génération de normes de réseau confondues.

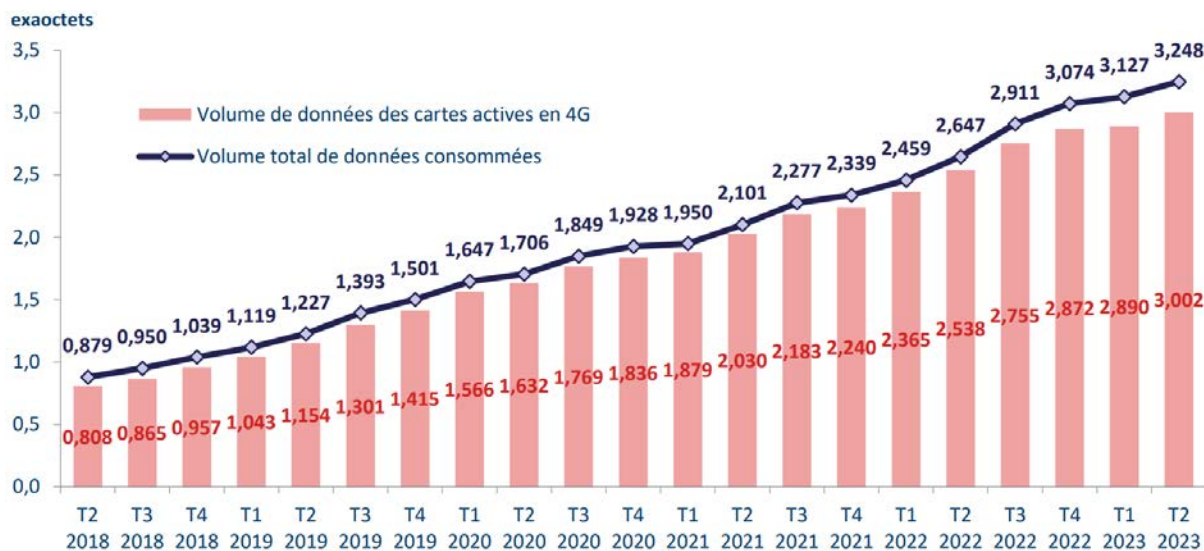


Figure 2 : Trafic de données consommées sur les réseaux mobiles en France depuis 2017 (ARCEP, 2023)

Les équipements du secteur du numérique utilisent de manière intensive un grand nombre de métaux lors de leur fabrication, parmi lesquels des métaux précieux et critiques. La Figure 3 indique qu'une large variété de métaux sont contenus dans un téléphone portable, représentant au total près de la moitié de la masse du terminal. En effet, **même s'ils ne sont parfois présents qu'en faibles quantités à l'échelle d'un terminal, ces métaux sont devenus indispensables** (propriétés semi-conductrices, électromagnétiques, etc.) **et leurs usages continuent à se diversifier** – propriétés quantiques par exemple, utilisation comme matériaux de cathode de batterie, comme élément de soudure, comme contacteurs, etc.³

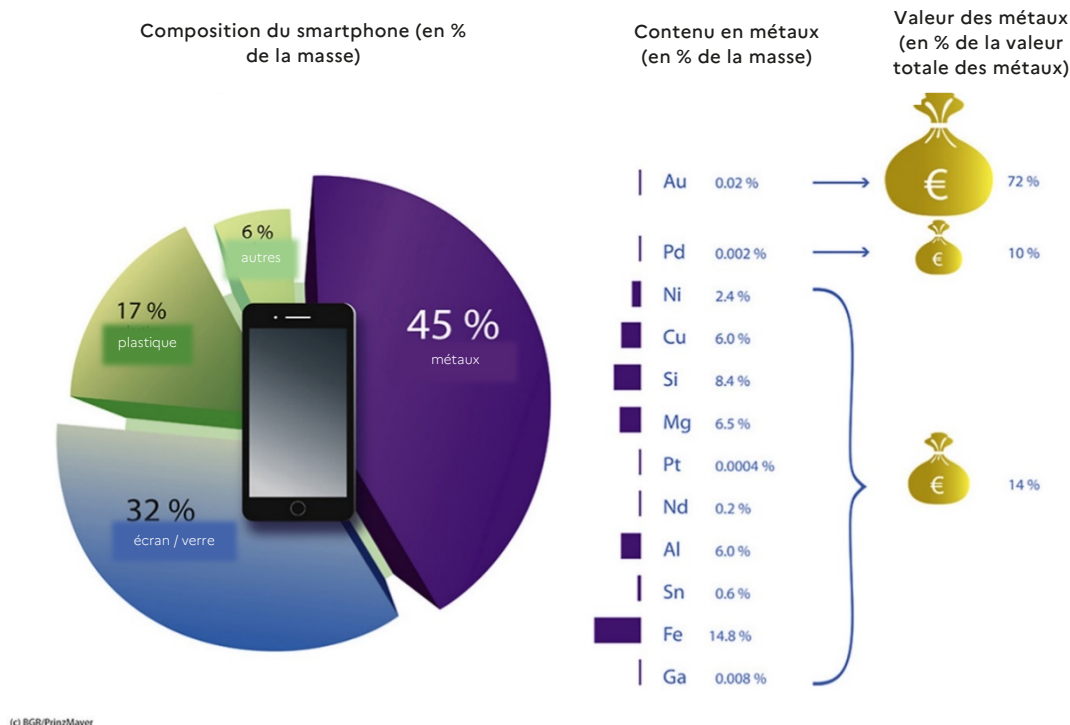


Figure 3 : Composition d'un téléphone portable classique (Bookhagen, 2020)

³ Les autres métaux peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, par exemple les piles et batteries (Zn, Mn, Ni, Pb), les alliages de métaux de structure (Be, Mg, Al, Fe, Cr, etc.), le secteur photovoltaïque, mais également dans les mémoires flash (Te) et les soudures (Bi).

1.1.1. Enjeux environnementaux des activités extractives

1.1.1.1. Analyses quantitatives des enjeux environnementaux liés à l'extraction des métaux

N.B. : Les impacts environnementaux détaillés dans cette sous-section sont liés aux activités extractives, mais le raffinage des métaux, ainsi que la fabrication des composants et des équipements les contenant sont autant d'étapes de production pouvant avoir un impact significatif.

La consommation de métaux par le secteur du numérique engendre de nombreux impacts environnementaux :

Emissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'extraction des métaux

La Figure 4 montre, en France, une **prépondérance de la phase de fabrication sur les émissions de CO₂ du secteur numérique**⁴ : cette phase est la principale source d'impacts pour les trois catégories d'équipements et infrastructures numériques (terminaux fixes et mobiles, réseaux et centres de données).

Les matériaux utilisés dans la fabrication des équipements numériques requièrent de grandes quantités de ressources et d'énergie et génèrent des déchets (notamment des roches extraites⁵). L'augmentation continue de la consommation d'équipements numériques, et donc de métaux contenus dans ces équipements, couplée à la hausse du nombre de métaux utilisés dans la construction de ces équipements (l'indicateur « Ressources utilisées » pourrait tripler d'ici à 2050), contribuera à **intensifier l'impact environnemental du numérique en 2030 et en 2050**. – cf. Figure 5.

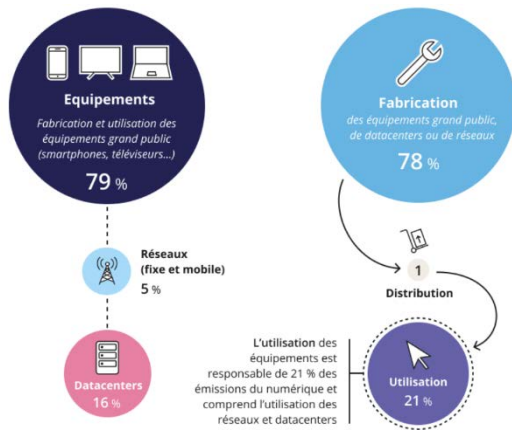


Figure 4 : Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par composantes du numérique (à gauche) et répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par phase du cycle de vie (%) (ADEME ARCEP, 2022)

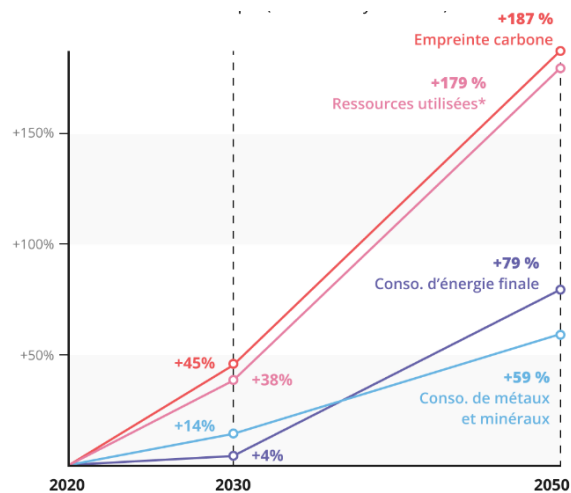


Figure 5 : Evolution du scénario tendanciel de 4 indicateurs de l'impact environnemental du numérique (sur tout le cycle de vie) (ADEME ARCEP, 2022) - * Définition MIPS prenant en compte les matériaux utilisés, la biomasse, les déplacements de terre mécaniques ou par érosion, l'eau et l'air

Par ailleurs, l'analyse menée par l'UNEP (2013) – cf. figures ci-dessous – permet de comparer l'impact environnemental des métaux en termes d'émissions de gaz à effet de serre et toxicité terrestre pour un

⁴ La notion de secteur numérique recouvre les secteurs d'activité producteurs et utilisateurs d'équipements numériques (terminaux, datacenters, réseaux) notamment les technologies de l'information et de la communication, et le secteur des télécommunications et médias.

⁵ En particulier les stériles miniers, déchets de roche générés lors de l'extraction des métaux (CGDD, 2023)

kilogramme de métal. La multiplication de ces valeurs unitaires par la production mondiale de ces métaux montre une hiérarchie différente, où les métaux de base (notamment fer, aluminium, nickel), contribuent significativement plus aux émissions de GES mondiales.

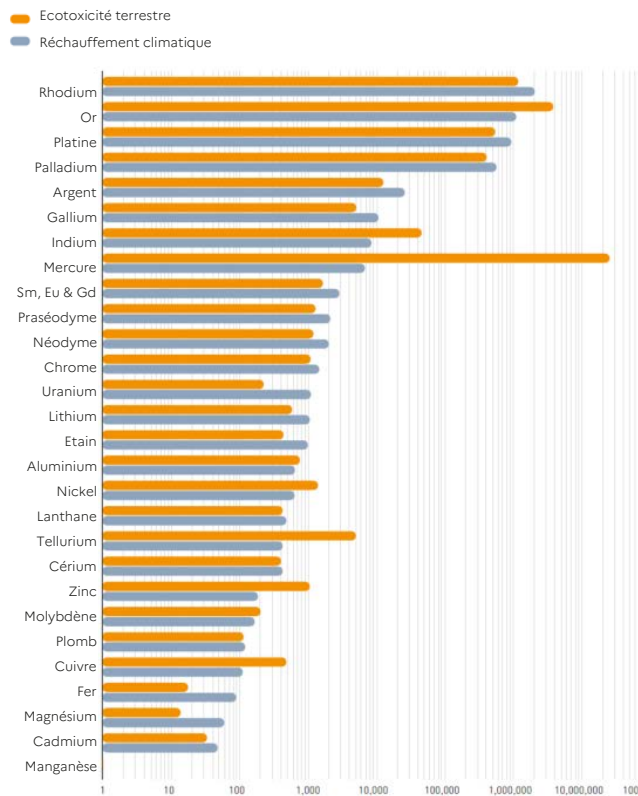


Figure 6 : Contribution cradle-to-gate d'un kg de métal aux émissions de GES (en CO2 eq.) et à l'émission de substances toxiques (en kg de 1,2 dichloroéthane équivalent), normalisé au Mn (=1) (UNEP, 2013)

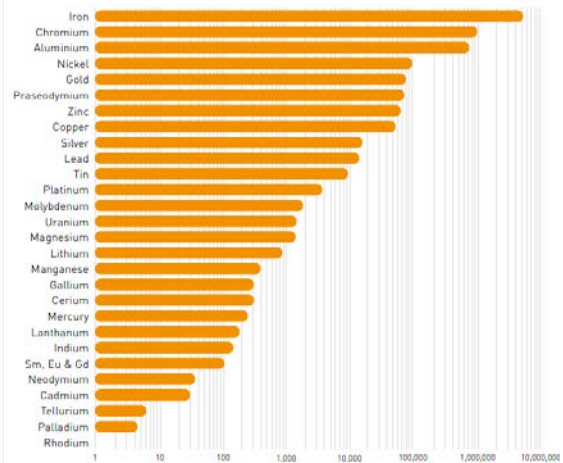


Figure 7 : Contribution de la production mondiale des métaux aux émissions de GES mondiales – normalisée à la production de Rh (=1) (UNEP, 2013)

Risque de déforestation liée à l'extraction des métaux

L'exploitation minière est une cause majeure de la déforestation, venant juste après l'agriculture et l'élevage en termes d'impacts directs et indirects. Depuis le début du siècle, les activités d'extraction ont doublé, menaçant davantage les forêts tropicales humides et les régions protégées, comme l'Amazonie et le Cerrado, en Amérique du Sud. Un rapport du WWF (2023) indique que l'or et le charbon sont les principaux contributeurs de cette déforestation liée à l'exploitation minière. Ces deux produits à eux seuls ont causé la **disparition de 6 877 km² de forêt au cours des vingt dernières années**⁶. D'autres minéraux contribuant également à ce phénomène sont la bauxite, le minerai de fer et le cuivre. C'est l'une des raisons pour lesquelles la France a élaboré en 2018 une Stratégie Nationale de lutte contre la Déforestation Importée (SNDI) visant à mettre fin à la déforestation causée par sa consommation de produits agricoles et d'élevage d'ici 2030.

L'exploitation minière conduit à défricher d'importantes étendues de forêt pour **créer des fosses et des routes d'accès**. Outre l'extraction elle-même, cette activité nécessite de l'énergie et entraîne la construction d'infrastructures supplémentaires, telles que celles dédiées à la transformation et au stockage à proximité des sites miniers.

⁶ Les activités minières constituent le quatrième facteur de déforestation derrière l'agriculture, les infrastructures et l'expansion urbaine (WWF, 2023). A titre de comparaison, la surface déforestée de forêt humide en Amazonie (Amazonie légale du Brésil) était de 9 001 km² pour la période août 2022 – juillet 2023 (Beuchle et al., 2023).

Dans ce contexte, il est primordial d'examiner l'impact de l'exploitation minière en relation avec la déforestation dans le cadre des besoins en métaux du secteur numérique. Actuellement, **la demande en équipements électroniques et informatiques est responsable de 5 % de la déforestation due à cette exploitation** (WWF, 2023) — cinquième position après la construction, les véhicules, machines et équipements et le secteur public⁷. Du fait des transitions énergétique et numérique, la demande en ressources minérales, comme le cobalt, le tantale et le chrome, augmentera considérablement.

Autre impacts environnementaux liés à l'extraction des métaux

D'autres impacts de la fabrication des équipements sur l'environnement et la santé humaine sont liés à l'extraction et à la transformation des matières premières (France Stratégie, 2020) :

- **Consommation énergétique** : 10 % de l'énergie primaire mondiale en 2010 (ordre de grandeur confirmé par une publication de 2015) était consacrée à extraire, transporter et raffiner les ressources métalliques tous secteurs confondus ;
- **Consommation d'eau douce**, indispensable à l'exploitation minière (traitement des minéraux, transports des minerais et résidus de traitement, suppression de poussières, etc.), ayant des impacts régionaux potentiels comme le détournement de cours d'eau ou l'épuisement des eaux souterraines par exemple. Cette consommation peut aggraver un phénomène de stress hydrique préexistant à l'activité minière ;
- **Pollution des cours d'eau ou des eaux souterraines** (drainage acide minier, rupture de barrage de bassins stockant les résidus de traitement, etc.), des sols, de l'air, atteinte la biodiversité (liée à la pollution des eaux, ou à la déforestation par exemple).

Faible récupération de certains métaux dans les équipements numériques en fin de vie

L'impact environnemental de la fabrication des équipements numériques est aggravé par le **faible taux de recyclage des métaux** (hors « grands métaux » : acier, aluminium et cuivre) en fin de vie. La plupart des autres métaux, notamment les terres rares, ne sont pas ou peu récupérés lors du processus de recyclage – cf. section 4.2. Cette faible récupération de certains métaux induit un maintien de la dynamique d'extraction des métaux utilisés par le secteur numérique.

1.1.1.2. Principaux risques environnementaux à chaque étape de traitement des métaux

Rappel des étapes de la chaîne de valeur des métaux jusqu'à la préparation des matières premières

Les différentes étapes de la chaîne de valeur d'extraction et d'affinage des métaux jusqu'à l'obtention de la matière première sont présentées en Figure 8. Les procédés de traitement présentés sont génériques :

- Ils peuvent être communs aux différents métaux, mais également spécifiques à un métal ou à un type de minerai ;
- Pour un même métal, différents procédés d'extraction ou de traitement peuvent être utilisés selon les sites ou le type de minerai.

⁷ Administration publique, sécurité sociale, défense

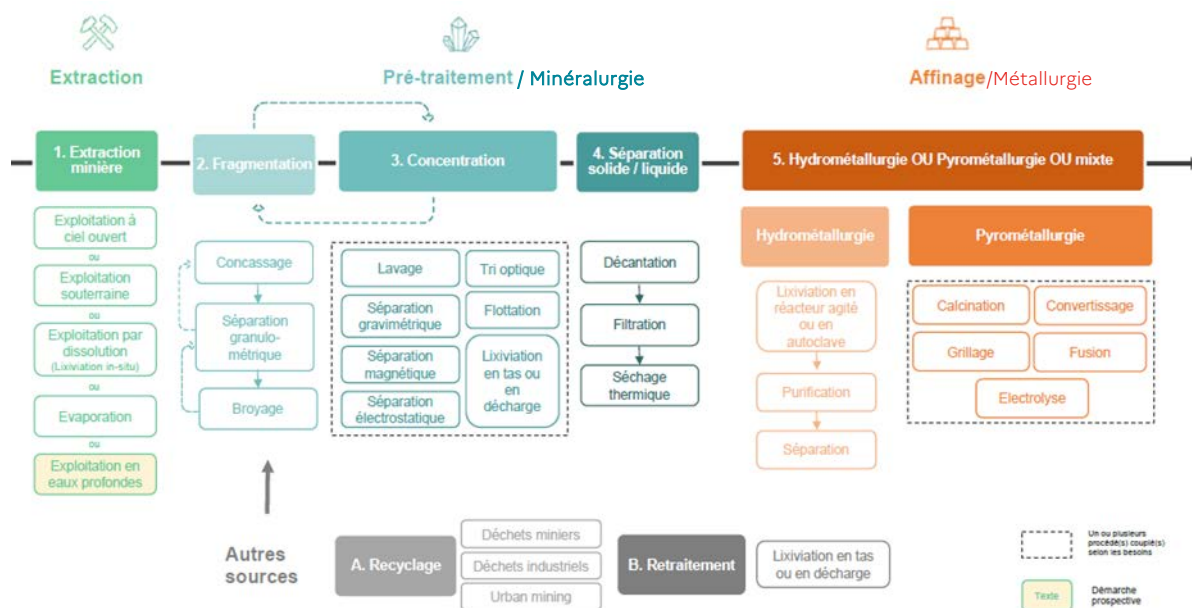


Figure 8 : Modélisation de la chaîne de valeur d'un minerai (RECORD, 2023)

Principaux risques environnementaux liés à la chaîne de valeur des métaux

Les risques environnementaux principaux à chaque étape de la chaîne de valeur en Figure 8 sont résumés dans le Tableau 1. Les risques présentés ici sont environnementaux, mais ils peuvent être également associés à des risques sociaux, par exemple un conflit d'usage sur l'eau avec les communautés locales – cf. ci-dessous.

Tableau 1 : Principaux risques environnementaux à chaque étape de traitement des métaux

Etape de procédé	Risques environnementaux associés (RECORD, 2023 et SystExt, 2021)
Extraction	<ul style="list-style-type: none"> L'exploitation à ciel ouvert et souterraine sont les plus utilisées et soulèvent le plus grand nombre de risques, mais tous les modes d'extraction ont un impact environnemental (eau, air, biodiversité, sols). Ainsi, l'exploitation génère souvent des eaux minières (ou eaux d'exhaures, présentes dans les sous-sols et pompées pour ne pas gêner l'extraction) et des stériles miniers (roches extraites pour accéder au minerai). L'exploitation en eaux profondes est susceptible d'avoir un impact environnemental élevé.
Minéralurgie/pré-traitement	<ul style="list-style-type: none"> Les procédés de pré-traitement sont énergivores, par ex. fragmentation. De grandes quantités de déchets et effluents sont produits, notamment dans les résidus miniers et lors de l'étape de concentration des métaux issus du minerai. Les procédés de concentration sont multiples, s'adaptent à chaque minerai et présentent chacun leurs propres risques. La flottation présente par exemple un risque chimique.
Métallurgie/affinage	<ul style="list-style-type: none"> L'étape d'extraction du métal génère des poussières, fumées et résidus miniers.

Etape de procédé	Risques environnementaux associés (RECORD, 2023 et SystExt, 2021)
	<ul style="list-style-type: none"> • Les risques associés à la pyroméallurgie, plus utilisée aujourd’hui que l’hydroméallurgie, portent sur la faune, la flore et la santé humaine. • L’hydroméallurgie apparaît moins risquée d’un point de vue environnemental, mais nécessite des quantités significatives d’énergie, et présente un risque de pollution de l’eau par les résidus et effluents de traitement.

Ces risques sanitaires et environnementaux sont également liés aux **mouvements de terrain** (effondrements, glissements, etc.), à la **contamination des sols** et aux **émissions de polluants atmosphériques**, notamment le SO₂ et les divers métaux émis lors du traitement pyroméallurgique des minerais.

Risques liés à la gestion des déchets solides, liquides et gazeux des processus d’exploitation et de traitement du minerai

La Figure 9 présente les déchets solides, liquides et gazeux associés à ces opérations.

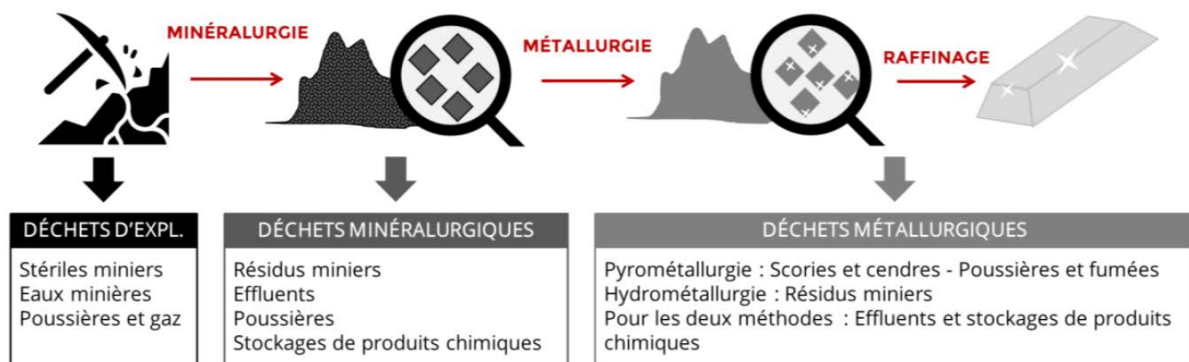


Figure 9 : Représentation schématique des principaux déchets solides, liquides et gazeux associés aux processus d’exploitation et de traitement du minerai (SystExt, 2021)

Les gisements métalliques sont caractérisés à la fois par la **faible teneur des roches hôtes en minerai**, et **l’association des métaux dans le minerai à d’autres métaux ou métalloïdes toxiques** pour l’environnement et la santé humaine. Par conséquent, l’industrie minière met en œuvre des procédés très consommateurs d’eau et d’énergie, et générant des quantités élevées de déchets.

Ainsi, les **risques sanitaires et environnementaux** liés au traitement et au stockage des déchets générés peuvent être importants, à la fois pendant l’exploitation et à très long terme après la fermeture d’un site minier. Ils sont en particulier liés à la **pollution des eaux** de surface et souterraines via :

- Les volumes conséquents **d’eaux minières polluées** par le contact avec les métaux excavés. C’est en particulier le cas lors des phénomènes de drainage minier acide (DMA), où les eaux minières mises en contact avec des sulfures entraînent en aval une pollution à l’acide sulfurique et aux métaux lourds ;
- Le **ruissellement des eaux dans les stériles miniers et les résidus de traitement**. A noter que les stériles miniers ne sont pas exempts d’éléments métalliques et peuvent polluer les eaux ;
- Les déversements accidentels (ou volontaires) de déchets et produits chimiques dans les eaux naturelles. En particulier, les pratiques de **déversement volontaire en milieu aquatique** de résidus de traitement – par exemple en mer, pratique appelée *marine tailings disposal* – présentent un risque environnemental majeur ;
- La **rupture de digues minières** retenant les volumes importants de résidus de traitement générés pendant l’exploitation, est susceptible de polluer les sols et les cours d’eau en aval.

1.1.2. Enjeux sociaux des activités extractives

Les activités extractives engendrent de nombreux risques sociaux, qui sont liés aux activités minières, aux relations avec les communautés locales et aux gouvernements locaux.

Risques liés aux activités minières

Les conditions de travail peuvent être dégradées dans certaines exploitations minières, en particulier celles situées dans les pays en voie de développement (France Stratégie, 2020). L'initiative financière du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEPFI, 2014) identifie les risques suivants :

- **Non-respect des règles de santé/sécurité** : incidents causés par des événements majeurs (effondrement de mines, équipements défectueux, etc.), maladies respiratoires et cutanées causées par l'exposition à des matières dangereuses, mauvaise gestion des incidents (ex. incendies, arrêt de l'usine, etc.), exposition des employés aux attaques et abus de la part de la population locale, etc.
- **Absence de négociation collective et syndicats** : illégalité des syndicats dans certaines juridictions, affaiblissement la position des travailleurs cherchant à faire valoir leurs droits (en cas d'offre de main-d'œuvre supérieure à la demande), etc.
- **Travail des enfants** : travail d'enfants sous la contrainte dans des environnements toxiques et dangereux sans mesures de sécurité adéquates, nonaccès ou faible accès à des droits de base tels que les soins de santé ou l'éducation, etc.
- **Discriminations envers les travailleurs migrants**. Les travailleurs migrants peuvent constituer une part importante de la main-d'œuvre dans les mines. Ils peuvent subir des discriminations liées aux heures de travail, aux taux de rémunération, à la formation et à l'éducation, aux conditions de logement ou à l'accès aux soins de santé.
- **Faible sécurité des opérations**. Le manque de sécurité efficace sur certains sites miniers peut entraîner des attaques, le vol d'équipements dangereux et un environnement dangereux pour les travailleurs. A l'inverse, les forces de sécurité peuvent réagir de manière excessive à des protestations contre un projet minier, ce qui peut entraîner une escalade de la violence.

Par ailleurs, **les mines artisanales et à petite échelle** (ASM – *artisanal and small-scale mining*) peuvent faire partie de la chaîne d'approvisionnement des grandes compagnies minières. Or, celles-ci peuvent utiliser une main-d'œuvre manuelle peu qualifiée et à avoir des normes de santé et de sécurité moins exigeantes que les entreprises multinationales.

Risques liés aux relations avec les communautés locales

L'initiative financière du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEPFI, 2014) identifie les risques suivants :

- **Dégradation du niveau de vie des populations locales** : déplacement des communautés loin des moyens de subsistance traditionnels, réduction du niveau de vie due aux impacts environnementaux (ex. poussière, émissions de polluants dans l'air, vibrations, contamination de l'eau et du sol), etc.
- **Non-respect des droits des populations locales et autochtones** : manque de consultation ; absence de consentement libre, préalable et éclairé des populations locales et autochtones ; absence ou arrangements de compensation injustes ou paiements retardés ; dommages aux sites culturels, historiques ou religieux ; etc.

Risques liés aux gouvernements locaux

L'UNEPFI (2014) identifie les risques suivants :

- **Non-respect des droits de l'homme par les gouvernements hôtes**. Les sociétés minières peuvent entretenir des relations avec un gouvernement qui contrôle la région où se trouve la mine et qui commet des violations des droits de l'homme (ex. travail forcé, répression sévère de groupes autochtones). Cela peut conduire à percevoir l'entreprise comme « complice » des abus.

- **Manque de transparence des revenus et fuite de capitaux** : Les Etats hôtes peuvent être plus propices à des pratiques de corruption ou peuvent expérimenter des périodes de fortes perturbations politiques/économiques.

Obligation faite aux entreprises donneuses d'ordre de prévenir les risques sociaux liés à l'extraction minière – Devoir de vigilance

Des législations spécifiques aux niveaux français et européen ont été mises en place pour renforcer les engagements des entreprises à surveiller leurs chaînes de valeur :

- La loi française sur le **devoir de vigilance**⁸, qui implique pour les fournisseurs de l'entreprise le respect de certains principes en matière sociale et environnementale. A noter que de plus en plus d'entreprises seront concernées par le devoir de vigilance dans le cadre de la directive européenne sur le devoir de vigilance.⁹ Dans le cas spécifique des métaux de batteries, le règlement « batteries »¹⁰ prévoit la mise en place d'un devoir de diligence relatif à certaines matières premières utilisées dans les batteries, et les risques sociaux et environnementaux associés.
- Le règlement européen sur les **minerais de conflit**¹¹, s'appliquant à l'or, à l'étain, au tantale et au tungstène – dont l'exploitation peut financer des conflits ou passer par du travail forcé, implique également la surveillance des activités des fournisseurs, et le respect de certains principes d'approvisionnement responsable.

En pratique, la contrebande peut limiter la traçabilité des chaînes de valeur. Ainsi, dans le cas du coltan (minerai de tantale), une partie du minerai serait extrait en République Démocratique du Congo (RDC), mais certifié par des organismes tiers comme venant du Rwanda voisin (Vicoulon, 2024), et donc comme minerai « libre de conflit ».

1.1.3. Enjeux de souveraineté et de criticité des activités extractives

1.1.3.1. Enjeux liés aux ruptures d'approvisionnement en métaux critiques et stratégiques

Les sites d'extraction minière et de raffinage des métaux sont situés à de multiples endroits du globe. Dans ce contexte, les métaux peuvent faire l'objet d'enjeux géopolitiques¹², leur **approvisionnement pouvant être stratégique** pour différents secteurs industriels du pays importateur. Le cas de la mainmise de la Chine sur la chaîne de valeur de plusieurs métaux, dont les terres rares, est un exemple éclairant (JRC, 2023a)

Les chaînes de valeur des métaux peuvent donc faire face à de nombreux risques de rupture d'approvisionnement. La notion de criticité permet d'appréhender ce risque en croisant deux dimensions relatives à un métal donné :

- **Le risque sur l'approvisionnement**, mesuré par différents indicateurs : disponibilité géologique, exposition politique des pays producteurs, impossibilité de substitution ou difficulté de recyclage, etc.

⁸ Loi n°2017-399 du 21 février 2017 relative au devoir de vigilance des sociétés mères et des entreprises donneuses d'ordres

⁹ Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive (EU) 2019/1937 (COM/2022/71)

¹⁰ Règlement (UE) 2023/1542 du Parlement européen et du Conseil du 12 juillet 2023 relatif aux batteries et aux déchets de batteries, modifiant la directive 2008/98/CE et le règlement (UE) 2019/1020, et abrogeant la directive 2006/66/CE

¹¹ Règlement (UE) 2017/821 du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2017 fixant des obligations liées au devoir de diligence à l'égard de la chaîne d'approvisionnement pour les importateurs de l'Union qui importent de l'étain, du tantale et du tungstène, leurs minerais et de l'or provenant de zones de conflit ou à haut risque

¹² Enjeux liés à la géopolitique, définie comme « l'étude des rivalités de pouvoirs et/ou d'influence(s) sur un territoire donné » (Lacoste, 2012)

- **L'importance économique** du métal pour le pays ou l'entreprise concernée : mesurant l'importance économique par l'évaluation de l'impact d'une rupture d'approvisionnement.

Les causes de risque de rupture d'approvisionnement en métaux ont été étudiées par Hatayama et Tahara (2018) pour 22 métaux, en analysant 448 événements entre 1967 et 2016, chaque événement pouvant avoir jusqu'à trois causes. La Figure 10 montre que 1. la chute du prix des métaux, 2. les grèves, 3. les accidents et 4. les catastrophes naturelles¹³ sont les principales causes de rupture d'approvisionnement. Les différends politiques liés à un contexte réglementaire ou politique particulier et engendrant des restrictions à l'export sont la cinquième cause de rupture d'approvisionnement.

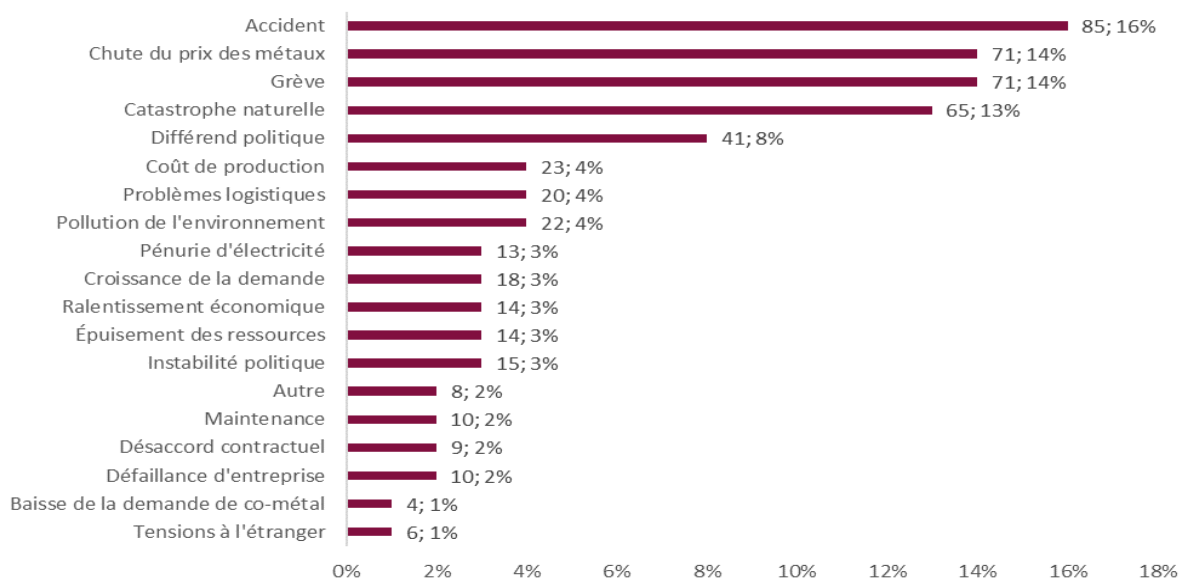


Figure 10 : Répartition des causes de rupture d'approvisionnement en part des événements analysés (en %). La figure présente également le nombre d'événements par catégorie d'événement (en valeur absolue)

A noter que la chute du prix des métaux entraîne des perturbations plus longues par rapport à celles engendrées par des grèves ou les accidents, avec une durée médiane de neuf mois contre respectivement un mois et trois semaines pour les grèves et les accidents. Les catastrophes naturelles endommagent les sites d'exploitations et causent également des dommages sur les infrastructures d'approvisionnement, créant des problèmes logistiques (Hatayama et Tahara, 2018).

Le Tableau 2 présente les premières causes de rupture d'approvisionnement par métal entre 1967 et 2016, et montre les spécificités des métaux dans l'exposition à certains risques, par exemple les terres rares ou le tungstène pour les différends politiques liés à leur extraction en Chine.

Tableau 2 : Premières causes de rupture d'approvisionnement identifiées par métal (Hatayama et Tahara, 2018)

Métal	1 ^{er} cause de rupture d'approvisionnement	Nb d'événements	Métal	1 ^{er} cause de rupture d'approvisionnement	Nb d'événements
Al	Chute du prix des métaux	7	Mo	Accident	3
Sb	Catastrophe naturelle	2	Ni	Accident	22
Bi	Pénurie d'électricité	1	Pt	Grève	10
Cr	Croissance de la demande	4	Dy, Pr, Nd	Différend politique	6
Co	Grève	6	Ag	Chute du prix des métaux	1
Cu	Accident	30	Ta	Ralentissement économique	3

¹³ Accident : problèmes sur site n'impliquant pas de cause naturelle, par exemple effondrement ou panne d'une machine. Catastrophe naturelle : fortes précipitations, typhons, glissements de terrain.

Métal	1 ^e cause de rupture d'approvisionnement	Nb d'évènements	Métal	1 ^e cause de rupture d'approvisionnement	Nb d'évènements
Au	Accident'	12	Tn	Chute du prix des métaux	3
In	Pénurie d'électricité	1	Ti	Catastrophe naturelle	1
Fe	Catastrophe naturelle	6	W	Différend politique	3
Pb/Zn	Chute du prix des métaux	13	V	Croissance de la demande	2
Mn	Croissance de la demande	3			

Les ruptures d'approvisionnement peuvent également perturber des étapes en aval de production d'équipements numérique. Si aucun risque d'approvisionnement sur le silicium métal n'a été identifié au cours de la présente étude, la transformation du silicium métal en puce électronique est une activité fortement consommatrice d'eau. Ainsi, la production mondiale des puces électroniques les plus avancées technologiquement étant concentrée à Taïwan¹⁴, les sécheresses ayant eu lieu en 2021 ont affecté la production des semi-conducteurs sur l'île, et ont réduit la disponibilité de l'eau pour les autres secteurs utilisateurs sur l'île, telle que l'agriculture (Techniques de l'ingénieur, 2022). Ce manque de disponibilité de l'eau s'est inscrit dans un contexte mondial de rareté des semi-conducteurs, perturbant en particulier la production du secteur automobile.

1.1.3.2. Enjeux liés aux liens entre prix des métaux, prix des composants et prix des équipements numériques

- La corrélation entre le prix des équipements et les prix des métaux contenus dans leurs composants est faible et reste secondaire par rapport à d'autres enjeux de compétitivité pour les fabricants de composants/équipements.

Selon un expert du secteur du numérique interviewé dans le cadre de cette étude, **la corrélation entre prix des équipements et prix des métaux n'est pas systématique.** Les câbles en cuivre sont un exemple de corrélation forte ; le prix des câbles en cuivre est proche de celui du cuivre. A l'inverse, les cartes graphiques sont un exemple de corrélation non-avérée entre le prix des matières et celui des équipements. En effet, le prix des cartes graphiques a fortement augmenté ces dernières années, mais principalement du fait de l'explosion des crypto-monnaies et de l'offre limitée en semi-conducteurs demandant des gravures¹⁵ très fines, les capacités de production de Taïwan – qui produit la majorité des puces électroniques les plus avancées d'aujourd'hui – n'étant pas extensibles (Etienne Lees-Perasso, 2023).

Cette corrélation s'applique notamment aux objets connectés (IoT), mais **reste secondaire par rapport à d'autres sujets liés à la compétitivité :**

- Pour les équipements IoT à coûts élevés, la corrélation entre le prix des équipements IoT et le prix des métaux est faible, les fabricants pouvant généralement absorber une hausse des coûts liée aux matériaux ;
- Pour les équipements IoT à bas coûts, la corrélation entre le prix des équipements et le prix des métaux est plus élevée que pour les équipements IoT à coûts élevés. Le prix des métaux contribue de manière non négligeable au coût unitaire de production de ces équipements et les marges pour ce type de produit sont moins élevées (Mavana et Bol, 2023).

Cet enjeu est détaillé en section 3.3.3.

¹⁴ 92% de la production de puces « logiques » d'une taille inférieure à 10nm est concentrée à Taïwan (Varas et al., 2021)

¹⁵ La gravure est un procédé qui consiste à retirer les couches de substrat à l'aide d'un acide. Dans l'industrie du semi-conducteur, pour la fabrication des composants électroniques, la lithographie est le procédé le plus utilisé.

- Le prix des composants et des équipements numériques n'est pas uniquement lié à leur contenu en métaux et dépend de nombreux facteurs structurels et conjoncturels¹⁶

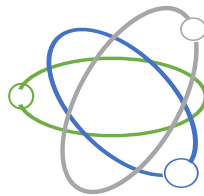
1.1.4. Résumé des enjeux liés à l'extraction des métaux

Enjeux environnementaux

- L'extraction, le transport et le raffinage des ressources métalliques sont responsables de **10 % de la consommation de l'énergie primaire mondiale en 2010**, de l'utilisation d'eau douce et de la **pollution** des ressources aquatiques, des sols, de l'air ainsi qu'une atteinte de la biodiversité.
- **La phase de fabrication des équipements numériques** (y.c. extraction des métaux) **est la principale source d'impacts environnementaux**, nécessitant des quantités importantes de ressources, d'énergie et générant une grande quantité de déchets. Le faible taux de recyclage des petits métaux aggrave cet impact.

Enjeux sociaux

- **Les activités minières entraînent des risques** de non-respect des règles de santé/sécurité, au travail des enfants, aux discriminations envers les travailleurs migrants ou au manque de dialogue social. Ceci est d'autant plus vrai pour les mines artisanales et à petite échelle, et dans les pays à forte instabilité politique voire en guerre.
- Les sites miniers portent également des risques liés aux **relations avec les communautés locales** : dégradation du niveau de vie et non-respect de leurs droits (ex. absence de consentement libre, préalable et éclairé).
- Les gouvernements hôtes peuvent également contribuer au non-respect des droits de l'homme ou être plus propices à des **pratiques de corruption**.



Enjeux de souveraineté et criticité

- Les sites d'extraction et de raffinage des métaux, dispersés à travers le monde, créent des **enjeux géopolitiques liés à leur approvisionnement**. La mainmise de la Chine sur la chaîne de valeur de métaux comme les terres rares en est un exemple.
- Les chaînes d'approvisionnement des métaux sont exposées à des risques de rupture. **La notion de criticité évalue ces risques en combinant le risque d'approvisionnement et l'importance économique du métal.**

Figure 11 : Résumé des enjeux liés à l'extraction des métaux

Le schéma ci-dessus résume les enjeux liés à l'extraction des métaux pour le secteur numérique. D'autres secteurs utilisateurs de métaux présentent une exposition similaire à ces enjeux – par exemple les batteries (Drapeau, 2020).

Il existe une interdépendance entre risques environnementaux et risques de ruptures des activités minières :

- L'impact de l'environnement sur la continuité des activités extractives et donc sur l'approvisionnement en métaux est significatif, à travers le risque représenté par les catastrophes naturelles. En revanche, les enjeux de criticité, à travers les cas présentés en section 1.1.3 de

¹⁶ Exemples : la hausse des coûts liés à l'extraction des métaux, le prix de l'énergie liée à l'extraction, le prix de l'énergie liée la fabrication, la hausse des coûts de la main d'œuvre pour la fabrication de composants électroniques, le monopole des fabricants de certains composants, etc.

risques d'approvisionnement, ne sont pas nécessairement liés aux impacts environnementaux des activités extractives ;

- Les évolutions réglementaires améliorant la traçabilité et la transparence des chaînes de valeur peuvent conduire à la **réduction des risques socio-environnementaux** présentés ci-dessus¹⁷.

1.2. Objectifs de l'étude

La présente étude poursuit un triple objectif :

1. **Identifier et quantifier l'utilisation de métaux** par le secteur du numérique en France, analyser leur criticité, et mieux comprendre la **fin de vie des équipements** du secteur numérique. Une attention particulière est prêtée à la cartographie des chaînes de valeur et à l'identification des principales étapes, technologies et acteurs afférents. Cette cartographie considère tant l'amont de la chaîne de valeur, de l'extraction jusqu'à l'intégration dans un équipement du secteur numérique que l'aval, de la collecte et du traitement des équipements contenant des métaux jusqu'à leur récupération en recyclage ;
2. Etablir des **projections aux horizons 2030 et 2050** de consommation de métaux par le secteur du numérique, à partir de la consommation établie pour l'ensemble du parc en France aujourd'hui ;
3. Proposer des solutions et des **pistes de recommandations pour couvrir les besoins futurs en métaux, tout au long du cycle de vie des équipements**. L'étude se donne pour objectif de formuler des **recommandations opérationnelles** pour l'ADEME, par exemple sur des problématiques d'approvisionnement, d'utilisation, de surconsommation, etc.

1.3. Périmètre de l'étude

Périmètre spatio-temporel de l'étude

Les besoins en métaux du numérique ont été étudiés pour **la France**, avec quelques références à l'Union européenne, notamment pour la fin de vie des métaux et le contexte réglementaire européen. Dans le cadre de ce périmètre France, il convient de rappeler que :

- Une large majorité des équipements numériques utilisés en France sont fabriqués en dehors de la France et de l'UE par des industriels européens (ex. Ericsson, Nokia) et non européens (ex. Samsung, Huawei, Apple, Cisco, Dell) ;
- Les composants, conçus et commercialisés majoritairement par des entreprises américaines (Qualcomm, Broadcom, Nvidia, Intel), en complément des acteurs de l'industrie microélectronique européenne (ex. STMicroelectronics, NXP, Infineon), sont produits très majoritairement par des fonderies asiatiques, en particulier TSMC à Taiwan (remarque du COPIL).

Les besoins en métaux du numérique ont été étudiés **actuellement** et dans le cadre d'une **analyse prospective à 2030 et 2050**, conformément aux partis pris méthodologiques de l'étude ADEME-Arcep (2022). Les résultats de cette analyse prospective sont présentés en section 4.3.

Equipements numériques considérés dans le périmètre de l'étude

Les biens d'équipements associés au TIC se décomposent en trois catégories selon l'International Telecommunication Union (ITU, 2011) :

- Les biens des utilisateurs finaux. Parmi eux, les **terminaux** fixes et mobiles. Selon les définitions, ces terminaux peuvent inclure les écrans électroniques, équipements IT à usage personnel ou professionnel, TIC des espaces publics, etc. ;

¹⁷ A noter : Le lien entre la traçabilité des chaînes d'approvisionnement et la réduction des risques socio-environnementaux n'est pas automatique. Les entreprises doivent mettre en place des politiques d'achats responsables pour mieux connaître, puis analyser, puis transformer leurs chaînes de valeur (ex. via des plans de mitigation des risques, des certifications) pour réduire les risques liés à leurs approvisionnements en métaux.

- Les biens du **réseau**, un « ensemble de nœuds et de liens qui fournissent physiquement, ou par voie aérienne, des informations et communications pour les connexions entre deux ou plusieurs points définis » ;
- Les **centres de données** (datacenters), qui désignent des « structures ou un groupe de structures, dédiés à l'hébergement, à l'interconnexion et à l'exploitation centralisés des équipements de télécommunication des technologies de l'information et des réseaux fournissant des services de stockage, de traitement et de transport de données ainsi que les installations et infrastructures de distribution d'énergie et de contrôle de l'environnement, ainsi que les niveaux nécessaires de résilience et de sécurité requis pour fournir la disponibilité de service souhaitée ». ¹⁸

Le périmètre analysé dans cette étude est toutefois plus large que celui considéré par l'ITU, et reprend une sélection des équipements considéré dans l'étude ADEME/Arcep (2022) sur l'empreinte environnementale du numérique en France. Il n'est toutefois pas exhaustif puisqu'il se concentre sur 20 équipements, à l'exclusion par exemple des ordinateurs fixes ou encore du réseau cuivre.

Le Tableau 3 présente les équipements considérés dans le périmètre de l'étude.

Tableau 3 : Equipements numériques considérés dans le périmètre de l'étude

Terminaux		
<ul style="list-style-type: none"> • Ordinateurs portables • Tablettes • Smartphones • Casques VR 	<ul style="list-style-type: none"> • Téléviseurs • Box TV • Ecrans d'ordinateurs • Autres écrans¹⁹ • Consoles de jeux vidéo de salon • Stations d'accueil 	Objets connectés IoT : <ul style="list-style-type: none"> • Automatisation • Bâtiment • Capteur • Passerelle • Sécurité
Réseaux		
Équipements réseaux fixes et mobiles :		Équipements communs :
<ul style="list-style-type: none"> • Stations de base (réseaux mobiles) • Box internet (réseaux fixes) 	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau agrégation / Backbone. 	
Datacenters		
<ul style="list-style-type: none"> • Serveur (fournissant la puissance de calcul) • Stockage (HDD et SSD utilisés pour stocker les données) 		

¹⁸ NF EN 50600-1 - Technologie de l'information - Installation et infrastructures de centres de traitement de données - Partie 1 : concepts généraux

¹⁹ Moniteurs spécifiques ; Ecrans d'affichage standards (y.c. écrans intégrés dans les moyens de transport ; Ecrans d'affichage spécifiques.

Métaux considérés dans le périmètre de l'étude

La Figure 12 présente les 25 métaux et métalloïdes²⁰ (Si, As, Ge, Sb) retenus pour le périmètre de l'étude, dont certains correspondent aux métaux identifiés comme critiques par la Commission européenne selon l'évaluation de mars 2023 (CE, 2023). Les métaux ont été proposés et débattus par le Comité de Pilotage de l'étude.

Figure 12 : Liste des 25 métaux considérés dans le périmètre de l'étude

Figure 12 : Liste des 25 métaux considérés dans le périmètre de l'étude

La liste des 25 métaux est issue d'entretiens d'experts et d'échanges avec le Comité de Pilotage. Plusieurs métaux ont été identifiés comme « métaux d'intérêt » mais n'ont pas fait l'objet de fiches individuelles :

- Le **béryllium**, a priori moins utilisé dans les équipements du secteur du numérique (Etienne Lees-Perasso, 2023), compte tenu notamment des exigences de la directive RoHS (WEEE Cycling, 2023). Ce métal est généralement utilisé sous forme d'élément d'alliage du cuivre (SCRREEN, 2023) et a donc été évoqué conjointement avec le cuivre.
- L'**arsenic**, dont la seule utilisation dans l'électronique identifiée est celle des semi-conducteurs à base d'arséniure de gallium (GaAs). Cette utilisation tendrait en outre à décliner selon un équipementier (Entretien avec un fabricant d'équipements numériques, 2023). Il a donc été évoqué conjointement avec le gallium
- Le **titane** : SCRREEN n'identifie pas d'utilisation significative du titane dans le secteur du numérique (SCRREEN, 2023). Le titane peut être utilisé pour les boîtiers d'équipements électroniques, mais est le produit d'un « effet de mode » (Louvigné, 2021). A noter néanmoins qu'entre 2016 et 2020, la dépendance aux importations de l'UE pour le titane était de 100 % et que plus d'un tiers du titane acheté en UE provenait de Russie (SCRREEN, 2023).
- Le **bismuth**, qui est utilisé en remplacement des soudures au plomb, en alliage avec l'étain (SCRREEN, 2023). Il a donc été évoqué conjointement avec l'étain. Par ailleurs, le bismuth a tendance à disparaître en raison du remplacement des soudures étain-plomb par des soudures étain-argent (WEEE Cycling).

Livrables pour les analyses des équipements numériques et des métaux du périmètre de l'étude

Afin de répondre au premier objectif de cette étude – cf. section 1.2, **45 fiches individuelles**, composées de 25 fiches « métaux » et 20 fiches « équipements » présentant la chaîne de valeur des métaux et quantifiant leur utilisation dans les équipements sélectionnés ont été réalisées. **Le présent rapport tient lieu d'introduction à ces fiches.**

²⁰ La désignation « métaux » sera conservée dans l'ensemble de l'étude

La limite suivante doit être considérée : **cette étude ne considère que les métaux effectivement incorporés dans les équipements**, et non ceux utilisés pendant le processus de production de ces équipements. Les quantités de matières utilisées mais non incorporées dans ces procédés de fabrication peuvent être toutefois significatifs. A titre d'exemple, dans le procédé de *spin-coating*, utilisé pour l'application de résine photosensible pour la gravure de semi-conducteurs sur les *wafers*, seul 2 à 5 % du matériau appliqué sur le substrat est utilisé. Le reste est perdu (Tajima et al., 2022). De même, dans les procédés de dépôt physique par phase vapeur (Physical Vapor Deposition – PVD) et de pulvérisation cathodique (*sputtering*), respectivement 3-8 % et 10-15 % seulement des métaux précieux utilisés sont effectivement déposés sur la surface du *wafer* ciblé (Materion, 2024).

2. Méthodologie

2.1. Rédaction des fiches métaux et indicateurs sélectionnés

Les fiches métaux synthétisent, pour chaque métal inclut dans le périmètre de l'étude, les informations ci-dessous.

2.1.1. Données générales et cartographie de la chaîne de valeur

Le Tableau 4 présente les indicateurs sélectionnés, les sources de données utilisées et, le cas échéant, les méthodologies de calcul utilisées.

Tableau 4: Indicateurs sélectionnés pour la phase de production des métaux

Indicateur	Commentaire
Production minière mondiale	La production minière mondiale n'est pas restreinte aux métaux utilisés dans le secteur numérique et concerne tous les secteurs d'activité. Utilisation des données USGS 2023.
Production minière française	Dans certains cas, une production minière existe sur le territoire français. Utilisation des données issues des fiches criticité du BRGM ou de l'Elémentarium, qui couvrent tous les secteurs d'activité.
Réserves mondiales et répartition des réserves mondiales	Les réserves mondiales et leur répartition concernent tous les secteurs d'activité. Utilisation des données USGS 2023.
Part de l'extraction du métal en tant que co-produit ou sous-produit	Pour certains métaux, en particulier les métaux dits « mineurs », les gisements sont très peu concentrés et l'extraction du métal n'est pas économiquement viable. Ces métaux sont présents dans les minerais d'autres métaux avec des propriétés physiques et chimiques similaires (IGF, 2023). La disponibilité de ces « co-métaux » est donc dépendante de l'extraction de leur métal « hôte ». La Figure 13 présente, pour chaque métal, la part du métal produite en tant que co-métal minoritaire. La Figure 14 présente les métaux hôtes et leurs co-métaux associés. Le germanium est par exemple à plus de 50 % un co-produit de l'extraction du zinc. Cet indicateur s'applique à tous les secteurs d'activité et pas seulement au numérique.
Principaux usages dans le monde	Principales applications du métal à échelle mondiale, dont le numérique et/ou les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC).
Usages dans les équipements numériques	Description des propriétés spécifiques du métal et identification des usages identifiés du métal dans les équipements numériques compris dans le périmètre de l'étude.
Production et demande mondiale pour le secteur numérique	Estimation de la part du métal utilisé dans les secteurs TIC et divertissement & média à partir du rapport <i>A high-level estimate of the material</i> publié par Ericsson Research (Malmodin et al., 2018). Selon les données disponibles, des informations sur les tendances de production et la demande dans les secteurs d'utilisation numériques ont été intégrées.
Quantification de l'usage dans les équipements numériques en France	Tonnage total de métal utilisé en France par an, à partir du contenu métallique pour chaque équipement et du nombre total d'équipements en France, issu des fiches « équipements » - cf. section 2.2.
Indicateur	Commentaire
Production minière mondiale	La production minière mondiale n'est pas restreinte aux métaux utilisés dans le secteur numérique et concerne tous les secteurs d'activité. Utilisation des données USGS 2023.

Indicateur	Commentaire
Production minière française	Dans certains cas, une production minière existe sur le territoire français. Utilisation des données issues des fiches criticité du BRGM ou de l'Elémentarium, qui couvrent tous les secteurs d'activité.
Réserves mondiales et répartition des réserves mondiales	Les réserves mondiales et leur répartition concernent tous les secteurs d'activité. Utilisation des données USGS 2023.
Part de l'extraction du métal en tant que co-produit ou sous-produit	Pour certains métaux, en particulier les métaux dits « mineurs », les gisements sont très peu concentrés et l'extraction du métal n'est pas économiquement viable. Ces métaux sont présents dans les minerais d'autres métaux avec des propriétés physiques et chimiques similaires (IGF, 2023). La disponibilité de ces « co-métaux » est donc dépendante de l'extraction de leur métal « hôte ». La Figure 13 présente, pour chaque métal, la part du métal produit en tant que co-métal minoritaire. La Figure 14 présente les métaux hôtes et leurs co-métaux associés. Le germanium est par exemple à plus de 50 % un co-produit de l'extraction du zinc. Cet indicateur s'applique à tous les secteurs d'activité et pas seulement au numérique.
Principaux usages dans le monde	Principales applications du métal à échelle mondiale, dont le numérique et/ou les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC).
Usages dans les équipements numériques	Description des propriétés spécifiques du métal et identification des usages identifiés du métal dans les équipements numériques compris dans le périmètre de l'étude.
Production et demande mondiale pour le secteur numérique	Estimation de la part du métal utilisé dans les secteurs TIC et divertissement & média à partir du rapport <i>A high-level estimate of the material</i> publié par Ericsson Research (Malmodin et al., 2018). Selon les données disponibles, des informations sur les tendances de production et la demande dans les secteurs d'utilisation numériques ont été intégrées.
Quantification de l'usage dans les équipements numériques en France	Tonnage total de métal utilisé en France par an, à partir du contenu métallique pour chaque équipement et du nombre total d'équipements en France, issu des fiches « équipements » - cf. section 2.2.

1 H Hydrogène																	2 He Hélium
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											6 B Bore	7 C Carbone	8 N Azote	9 O Oxygène	10 F Fluore	11 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Paladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57-71 Lanthanide series	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-103 Actinide series	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Uu Ununpentium	116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium
Lanthanide series			57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium
Actinide series			89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium



Part du métal (%) primaire produit en tant que co-métal

Figure 13 : Tableau périodique de la « companionship* » à échelle mondiale pour 2008. Les métaux majoritairement hôtes apparaissent en bleu, et ceux extraits en tant que co-métaux en rouge (Nassar et al., 2015)

*La *companionalité* permet de mesurer si un métal est obtenu en grande partie ou entièrement comme sous-produit d'un ou de plusieurs métaux hôtes à partir de minerais géologiques.

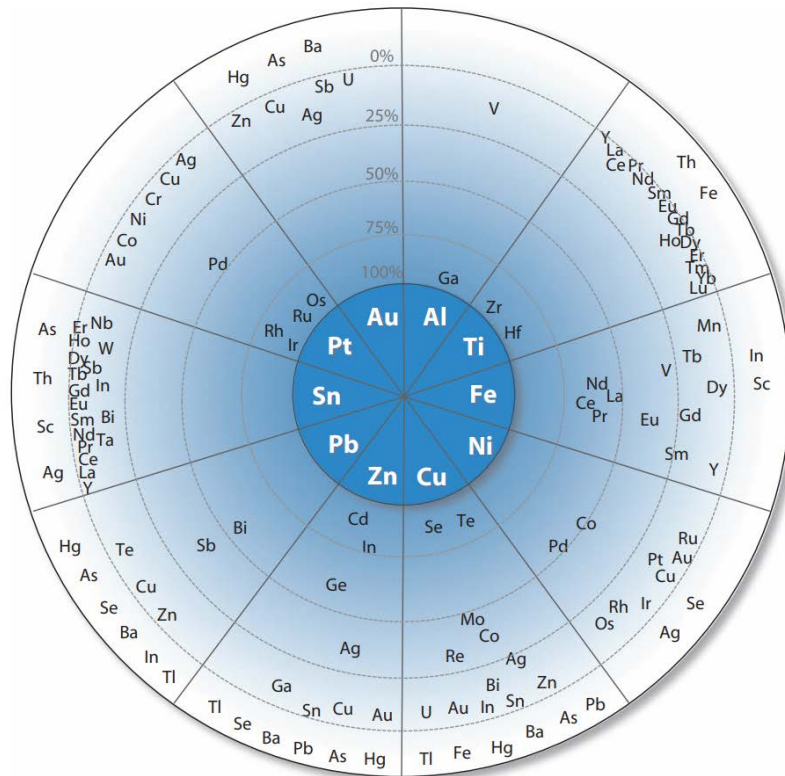


Figure 14 : Roue de la « companionship » des métaux (Nassar et al., 2015)

Dans la roue de la *companionalité*, les métaux hôtes principaux forment le premier cercle intérieur. Les co-métaux apparaissent dans les autres cercles. La distance des co-métaux au métal hôte est proportionnelle à la part de production en tant que co-métal. Les éléments dans le dernier cercle (en blanc) sont ceux pour lesquels la part de production primaire avec le métal hôte n'a pas été déterminée.

La chaîne de valeur de chaque métal utilisé dans le secteur numérique est cartographiée et présentée en suivant le modèle du Tableau 5. La cartographie est cependant limitée aux premières étapes de la chaîne de valeur : Matière première (dont extraction du minerai) et Matériau transformé. Une recherche bibliographique préalable a permis **d'identifier, pour chaque métal, les usages dans les composants des équipements numériques, les matières premières et les matériaux transformés associés.**

Tableau 5 : Représentation de la chaîne de valeur des métaux utilisée dans l'étude

1. Etape de la chaîne de valeur X							
	Technologies et procédés de transformation						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1.A Production de la matière première A</th> <th>1.B Production de la matière première B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Localisations (pays) de transformation pour la matière première A Si disponible, acteur(s) industriel(s) responsable de la transformation X</td> <td>Localisation (pays) de transformation pour la matière première B Si disponible, acteur industriel responsable de la transformation Y</td> </tr> <tr> <td>Produits et marchés pour la matière première A</td> <td>Produits et marchés de la matière première B</td> </tr> </tbody> </table>	1.A Production de la matière première A	1.B Production de la matière première B	Localisations (pays) de transformation pour la matière première A Si disponible, acteur(s) industriel(s) responsable de la transformation X	Localisation (pays) de transformation pour la matière première B Si disponible, acteur industriel responsable de la transformation Y	Produits et marchés pour la matière première A	Produits et marchés de la matière première B
1.A Production de la matière première A	1.B Production de la matière première B						
Localisations (pays) de transformation pour la matière première A Si disponible, acteur(s) industriel(s) responsable de la transformation X	Localisation (pays) de transformation pour la matière première B Si disponible, acteur industriel responsable de la transformation Y						
Produits et marchés pour la matière première A	Produits et marchés de la matière première B						

Les données relatives à la chaîne de valeur sont obtenues par recherche bibliographique. Les sources utilisées sont indiquées dans chaque fiche.

2.1.2. Enjeux de marché et évaluation de la criticité

En introduction de la partie 2 criticité de chaque fiche, un tableau représente les restrictions commerciales du métal à l'export par les pays producteurs identifiés. Quatre niveaux de restrictions sont identifiés ainsi qu'une catégorie « autres mesures ». Les données utilisées sont celles de l'outil « *Compare your country, Trade in Raw Materials* » de l'OCDE (2022) pour l'année 2021.

Le Tableau 6 présente les indicateurs sélectionnés, les sources de données utilisées et, le cas échéant, les méthodologies de calcul utilisées. Ces indicateurs sont tirés de ceux développés par le BRGM/OFREMI pour le World Material Forum (BRGM, 2022), et ont été sélectionnés en accord avec le BRGM/OFREMI. Chaque indicateur est noté de 1 (score le plus bas) à 5 (score le plus élevé).

Tableau 6 : Indicateurs de criticité utilisés dans la présente étude

	Indicateurs	Source données	Périmètre d'application	Méthodologie
BRGM/OFREMI	Longévité des réserves connues	USGS	Par métal	Toutes applications confondues
	Incertitude sur la disponibilité du métal	BRGM/OFREMI	Par métal	Toutes applications confondues, incertitude sur la disponibilité du métal à 2030
	Risques géopolitiques de l'approvisionnement	World Governance Index (WGI)	Par pays producteurs miniers	Calcul d'un score moyen par métal avec pondération selon la part de production de chaque pays minier <i>Remarque</i> : Le choix a été fait de garder les six indicateurs WGI pour obtenir un score moyen par pays. Ce score peut parfois apparaître peu significatif dans l'évaluation de la criticité des métaux.
	Volatilité du prix du métal	BRGM/OFREMI	Par métal	Cours du métal toutes applications confondues
DELOITTE	Performance environnementale de la production minière	Graedel and al., 2015	Par métal	Le score Graedel a été construit à partir de l'ACV (cradle-to-gate) des métaux, de l'extraction jusqu'à la fabrication de matière première, prenant en compte les différentes formes chimiques et physiques du métal. Reprise des score des impacts environnementaux par kg de métal (entre 0 et 100) adaptés pour obtenir des scores entre 1 et 5 avec pondération selon la part de production de chaque pays
	Performance sociétale de la production minière	Indicateur de Développement Humain (IDH)	Par pays producteurs miniers	Calcul d'un score moyen par métal avec pondération selon la part de production de chaque pays minier

Focus sur la notion de criticité

L'analyse de criticité consiste à croiser deux dimensions pour classer les métaux selon leur degré de criticité, à l'échelle d'un pays, d'un groupe de pays ou d'une organisation (CGDD, 2023) :

- **L'importance stratégique** du métal pour l'entité ;
- **Le risque sur l'approvisionnement** du métal.

De nombreuses méthodologies en France et à l'international ont été développées pour estimer la criticité d'un métal, notamment par le BRGM, la Commission européenne, l'IFPEN, l'USGS, le BGS, etc. Cette étude reprend certains indicateurs de la méthodologie créée par le BRGM pour le World Materials Forum.

2.1.3. Historique des prix et de la demande en France et dans l'UE

Le Tableau 7 présente les données utilisées dans les fiches métaux, relatives aux prix des métaux.

Tableau 7 : données présentées dans les fiches métaux relatives aux prix des métaux

Indicateur	Commentaire
Historique des prix	Historique des prix selon les cotations de références identifiées. Utilisation des schémas des fiches SCRREEN (2023).
Variations significatives des prix et effets en France	Interprétation qualitative des variations de prix significatives identifiées. Utilisation des données des fiches SCRREEN (2023). Dans le cas où la France est un pays producteur minier et/ou métallurgique, description des effets sur la production du métal en France. Données issues des fiches criticité BRGM et d'articles de presse.

2.1.4. Pratiques de recyclage en France

Le Tableau 8 présente les données relatives au recyclage des métaux contenus dans les équipements numériques, et le Tableau 9 le format utilisé pour présenter les acteurs et procédés de récupération des métaux identifiés.

Tableau 8 : Données relatives au recyclage des métaux contenus dans les équipements numériques

Indicateur	Commentaire
Métal contenu dans les équipements numériques triés pour récupération du métal	A partir des informations apportées par l'indicateur « Usages dans les équipements numériques » (cf. section 2.2), il est possible d'estimer le type de fractions (ex. métaux non ferreux) et composants (cartes électroniques, batteries, etc.) triés en fin de vie contenant le métal en question.
Acteurs majeurs et procédés de récupération du métal en France et dans l'UE	Sur le modèle du Tableau 9, l'indicateur liste les acteurs identifiés de la récupération des métaux à partir des composants ou des fractions de DEEE triés identifiés. A noter que cette liste exclut, d'une part, les procédés de récupération non industrialisés (projets pilotes, R&D, etc.), et, d'autre part, ceux qui ne ciblent pas spécifiquement le métal en question, qui est alors « perdu » dans le procédé de récupération.
Utilisation du métal recyclé	A partir des entretiens et de la recherche bibliographique, types d'utilisations possibles pour le métal recyclé

Tableau 9 : Format de tableau listant les acteurs majeurs de la récupération du métal issu des composants ou fractions récupérées à l'étape de tri des DEEE

Acteur	Pays	Composant recyclé	Volume traité du composant recyclé en tonnes	Procédés utilisés	Volume de métal récupéré	Produit final
Acteur A	X	Ex 1 : Cartes électroniques	Site A : France B : xx			

2.2. Rédaction des fiches équipements

2.2.1. Données générales

Le Tableau 10 présente les données utilisées dans les fiches équipements, relatives aux fonctions, caractéristiques et usages des équipements.

Tableau 10 : Méthodologie utilisée pour obtenir des données générales sur les équipements

Indicateur	Commentaire
Fonction	Définition de l'équipement et de sa fonction
Nombre d'équipements / Usages types	Parc (nombre d'équipements) en France d'après ADEME/ARCEP (2022). Cet indicateur inclut également une typologie d'équipements
Durée de vie	Durée de vie des équipements telle qu'indiquée dans l'étude ADEME/ARCEP (2022)
Caractéristiques techniques	Différents types d'équipements mis sur le marché – par exemple télévision écran LCD ou OLED. Caractéristiques techniques des équipements telles qu'envisagées dans l'étude ADEME/ARCEP (2022)

2.2.2. Données de composition matière utilisées

Obtenir une composition métallique précise et détaillée d'un équipement est une tâche complexe, qui nécessite un *bill of materials* (BoM), une déclaration complète des matériaux (FMD), voire des analyses avancées comme l'ICP (technique analytique de plasma à couplage inductif).

Dans le cadre de cette étude, les données de composition matière²¹ des équipements sont issues d'une revue des travaux publics disponibles. Elles ont fait l'objet de commentaires de la part du COPIL et des entreprises interrogées et constituent donc une base d'évaluation solide. Ces données ont été croisées avec deux autres sources :

- Données de flux de matières issues de la base de données Ecoinvent²², en excluant les flux de matière utilisés dans le processus de production. Pour chaque équipement considéré, la fiche indique la part d'un métal donné par rapport à la somme des masses des métaux identifiés dans Ecoinvent et inclus dans le périmètre d'étude ; Pour des parts relatives très faibles, celles-ci sont indiquées comme étant inférieures à 0,01 %.
- Vérification par un expert de l'industrie du recyclage des métaux ou du monde académique interrogés dans l'étude, en fonction de leur périmètre d'expertise.

Pour chaque équipement, la méthode d'estimation du contenu métallique est résumée dans le Tableau 11 ci-dessous.

Cette base de données pourrait être encore améliorée grâce à des informations plus précises provenant des industriels, néanmoins tenus par la volonté de protéger leurs secrets de fabrication. A date, les données publiques des fabricants d'équipements numériques se concentrent principalement sur les « grands métaux » tels que le fer, l'aluminium et le cuivre (remarque du COPIL).

Le *Digital Product Passport*, en cours de développement dans le cadre du règlement européen sur l'éco-conception des produits durables²³, pourrait contribuer à améliorer la transparence sur le sujet (remarque du COPIL).

²¹ Quantité de métal incorporé par équipement, en grammes.

²² Base de données d'Inventaires de cycle de vie (ICV) destinée à fournir les données nécessaires à une Analyse de cycle de vie (ACV).

²³ Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits durables et abrogeant la directive 2009/125/CE COM/2022/142 final

Tableau 11 : Méthode d'estimation du contenu métallique des équipements inclus dans le périmètre d'étude

Méthode d'estimation du contenu métallique	Equipements considérés
Recherche bibliographique avec vérification par un acteur de l'industrie du recyclage ²⁴	<ul style="list-style-type: none"> - Téléviseurs - Smartphones - Ordinateur portable - Ecran d'ordinateur - Console de jeux - Box internet - Box TV - Réseau agrégation et backbone
Recherche bibliographique	<ul style="list-style-type: none"> - Serveur - Stockage - Tablette - Station de base - Casque AR/VR
Extrapolation à partir de données de composition matière existantes pour des équipements similaires	<ul style="list-style-type: none"> - Autres écrans : extrapolation à partir de données de composition pour un écran LCD - Objets connectés IoT (cinq types d'objets) : extrapolation à partir de données de composition pour un smartphone première génération (< 4,5'')

Les fiches équipements présentent également les caractéristiques techniques (dimensions, technologie, etc.) des équipements dont la **composition métallique** – ou *Bill of Materials (BoM)* – est détaillée dans les sources bibliographiques.

A partir du nombre d'équipements et de leur durée de vie estimée, il est possible d'estimer un flux de métal A contenu dans les équipements **arrivant en fin de 1^{ère} vie chaque année** par le calcul suivant :

$$\text{Métal A en fin de 1^{ère} vie (t)} = \frac{\text{Parc d'équipement (nombre)} \times \text{Contenu en métal A (g)}}{\text{Durée de vie (n)}}$$

2.2.3. Méthode de calcul du gisement disponible au recyclage en fin de vie

A partir des entretiens avec les experts de la fin de vie des équipements du secteur numérique et de la recherche bibliographique (cf. section 4), l'étude détermine les **métaux disponibles en recyclage** en deux étapes :

1. Evaluation des fractions et composants des DEEE effectivement collectés et séparés à l'étape de tri : batteries, métaux ferreux, cuivre, aluminium, disques durs. Les métaux effectivement recyclés issus de ces fractions sont présentés en section 4.3 : Les principaux métaux triés puis récupérés en France sont le cuivre, l'aluminium et les métaux précieux (l'or, l'argent, le platine et le palladium contenus dans les cartes électroniques) (Ecologic, 2023). Certains autres métaux présents dans l'équipement peuvent être récupérés, selon le site de traitement et la fraction traitée.
2. Calcul de la part des équipements arrivant en fin de vie effectivement disponible au recyclage. En effet, une part significative des équipements en fin de vie n'est pas collectée pour recyclage par la filière conventionnelle : thésaurisation, filières parallèles et réemploi des équipements limitent les quantités disponibles. Cette part est estimée en additionnant la part (en %) de ces exutoires en fin de vie²⁵, pour chaque type d'équipement du secteur numérique. La part de ces exutoires provient d'une

²⁴ Les vérifications ont été faites par rapport à des données de caractérisation de batchs de 20t de composants d'équipements du même type (WeeeCycling, 2023)

²⁵ Pour les équipements ménagers : Déchèterie, distributeurs, revente à un récupérateur, don à une association/ recyclerie/ ressourcerie, encombrants. Pour les équipements professionnels : Gestionnaire de déchets spécialisé, éco-organisme, opérateur de traitement autorisé, point apport privé et public, fabricant en système individuel, revendeurs

enquête menée auprès des ménages par Ecologic (2020) pour les équipements ménagers, et du baromètre des pratiques Green It des entreprises en France (AGIT, 2020).

Il est alors possible d'estimer une **quantité de métaux disponibles au recyclage** pour l'équipement concerné

$$\begin{aligned} & \text{Métal A disponible au recyclage} \\ &= \text{part du gisement effectivement disponible au recyclage (\%)} \\ &\times \text{Métal A en fin de 1ère vie (t)} \end{aligned}$$

En l'absence d'information, les métaux utilisés comme éléments d'alliages dans une fraction métallique récupérée (acier, aluminium, cuivre) sont considérés comme « perdus » car recyclés en boucle ouverte.

2.2.4. Etat des lieux des freins au recyclage des métaux contenus dans l'équipement en fin de vie

A partir des entretiens avec des experts de la fin de vie des équipements du secteur numérique et de la recherche bibliographique (cf. section 4), l'étude a déterminé des freins au recyclage des métaux contenus dans chaque équipement considéré.

2.3. Analyse prospective à 2030 et 2050

2.3.1. Scénarios intégrés à la modélisation prospective

Tous les scénarios étudiés sont issus du **Feuilleton ADEME « Transition(s) 2050 »** pour le secteur du numérique (ADEME, 2024). Ces scénarios avaient été utilisés pour le rapport 3 de l'étude ADEME-Arcep (2022), notamment car chaque scénario associe un parc et un flux à chaque équipement (cf. section 2.3.2). Les hypothèses retenues dans la présente étude sont les mêmes que celles retenues dans le Feuilleton ADEME « Transition(s) 2050 ».

Les scénarios retenus dans le cadre de la présente étude sont indiqués dans le Tableau 12 et sont présentés en détail en section 5.1.1.1.

Tableau 12 : Liste des scénarios à 2030 et 2050 retenus dans le cadre de la présente étude (d'après ADEME, 2024)

Horizon temporel	Scénarios pris en compte dans la modélisation
2030	<p>Scénario tendanciel :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hors substitutions ; • Avec des niveaux de substitution modérés pour les variables identifiées ; • Avec des niveaux de substitution élevés pour les variables identifiées.
2050	<ul style="list-style-type: none"> • Scénario tendanciel ; • Scénario S1 Génération frugale ; • Scénario S2 Coopérations territoriales ; • Scénario S3 Technologies vertes ; • Scénario S4 Pari réparateur. <p><i>Pour chaque variable identifiée, un niveau de substitution à 2030 a été sélectionné, puis a été appliqué à 2050 pour les cinq scénarios à 2050.</i></p> <p><i>Les scénarios S1, S2, S3 et S4 sont détaillés dans le Tableau 33.</i></p>

2.3.2. Evolution du nombre d'équipements d'ici à 2030 et 2050

Dans la mesure du possible, les flux et parc d'équipements par scénario sont issus de l'étude ADEME-Arcep (2022). Des alternatives ont été proposées lorsque ces données n'étaient pas indiquées ou que d'autres données plus récentes étaient disponibles – cf. Tableau 13.

Tableau 13 : Méthodologie d'évaluation du nombre d'équipements en 2030 et 2050

Equipements	Méthodologie de calcul du nombre d'équipements
Téléviseur ; Smartphone ; Tablette ; Ordinateur portable ; Ecran d'ordinateur ; Console de jeux vidéo de salon ; Autre écran ; Box TV ; Station d'accueil ; 5 types d'objets connectés IoT ; Station de base	Les données de parc, de flux et de durée de vie des équipements de l'étude ADEME-Arcep (2022) ont été reprises.
Casque AR-VR	<ul style="list-style-type: none"> - Le nombre de casques AR-VR estimé par le projet CEPIR (2024) est utilisé pour la prospective en termes de nombre d'équipements total ; - La durée de vie des casques AR-VR est issue du projet CEPIR (2024) ; - La répartition entre casques AR-VR ménagers et professionnels est estimée à partir de la répartition donnée par l'étude ADEME-Arcep (2022).
Box internet	<ul style="list-style-type: none"> - Parc et flux : l'évolution des parcs et flux de box internet et box TV sont similaires entre 2030 et 2050. Seule la durée de vie a un impact à long terme ; - Les données de parc en 2020 sont issues de l'étude ADEME-Arcep. Pour l'analyse prospective à 2050, la durée de vie des box internet évolue proportionnellement à celle des box TV pour les scénarios « Génération frugale » et « Coopérations Territoriales ».
Fibre optique	<ul style="list-style-type: none"> - Parc : On estime qu'à partir de 2030, le déploiement de la fibre optique correspond uniquement au renouvellement des brins usagés. Hypothèse : A partir du déploiement de la fibre (nombre de kilomètres) en 2022 et de la part du réseau d'agrégation que cela représente, on obtient le nombre de kilomètres de brins en 2030 pour couvrir l'intégralité du réseau d'agrégation. Ce « parc d'équipements » reste stable entre 2030 et 2050* (cf. détail des hypothèses dans la fiche « Réseau d'agrégation et backbone »). <i>*Cette hypothèse a été validé par un expert des télécommunications.</i> - Flux : Le flux de câbles de fibres optiques est estimé à partir de la durée de vie « pratique » de ces câbles (35 ans**). <i>**Selon un expert, la durée de vie réelle des câbles optiques serait comprise entre 30 et 40 ans (SYCABEL, 2023).</i>
Serveur ; Stockage	<ul style="list-style-type: none"> - Le parc de serveurs (et des dispositifs de stockage) pour tous les scénarios a été estimé à partir du ratio superficie en m² IT / parc de serveurs en 2020, multiplié ensuite par la superficie en m² IT du scénario en question en 2030 et 2050. Toutes ces informations sont disponibles dans l'étude ADEME-Arcep (2022). - On estime que la durée de vie reste la même pour tous les scénarios.

2.3.3. Evolution des compositions métalliques unitaires des équipements et variables associées

Pour chaque fiche équipement, une composition métallique unitaire a été calculée à partir de données bibliographiques et/ou d'entretiens avec des experts, comme l'indique la section 2.2.2.

D'ici à 2030 et 2050, ces compositions métalliques seront amenées à être modifiées selon **cinq variables prioritaires**, identifiées selon les étapes suivantes :

1. Identification des principales variables via des entretiens et la bibliographie : dix variables identifiées. Certaines variables concernent les composants et les équipements (ex. dispositifs de stockage HDD et SSD ; écrans LCD et OLED), tandis que d'autres s'appliquent aux métaux contenus (ex. aluminium, or) ;

2. Sélection de cinq variables prioritaires significatives du point de vue des changements de composition matière et modélisables en utilisant les données bibliographiques collectées au cours de l'étude. Cinq variables n'ont donc pas été intégrées à la modélisation pour cause de données insuffisantes et/ou de faible impact du point de vue des métaux, et sont décrites dans le Tableau 14 ;
3. Quantification et intégration des variables prioritaires à la modélisation, selon différents niveaux de substitution (niveaux faible, modéré et élevé) à partir de références bibliographiques et d'entretiens avec des experts.

Tableau 14 : Récapitulatif des variables à 2030/2050 sélectionnées

Variables intégrées à l'étude qualitativement et quantitativement	Variables intégrées à l'étude qualitativement uniquement
<ol style="list-style-type: none"> 1. Baisse de la concentration en or dans les équipements ; 2. Baisse de l'utilisation d'aluminium dans les équipements ; 3. Remplacement des dispositifs de stockage HDD par des dispositifs SSD * ; 4. Remplacement des technologies d'écrans LCD par OLED* ; 5. Evolution des technologies de réseaux (2G-4G → 5G → 5G millimétrique et 6G)*. <p><i>*Tendance modélisée dans l'étude ADEME-Arcep (2022).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Transition vers les DC Edge / High Performance Computing ; 2. Hausse de la consommation de GPU dans le cadre du développement de l'IA 3. Centralisation / virtualisation des réseaux ; 4. Baisse de la consommation d'étain pour certains équipements (hors brasage des CMS) ; 5. Densification des modules, puces et micro-processeurs.
<i>Ces variables sont présentées en détail en section 5.1.1.2.1.</i>	<i>Ces variables sont présentées en détail en section 5.1.1.2.2.</i>

3. Métaux et numérique

3.1. Utilisation des métaux dans le secteur numérique

3.1.1. Caractéristiques des métaux

Les métaux ont de multiples caractéristiques qui permettent de répondre à de nombreuses applications. D'autres facteurs entrent néanmoins en jeu (prix, consommation d'énergie, etc.) qui conduisent à utiliser ou non ces métaux. Les caractéristiques suivantes ont été identifiées pour l'utilisation des métaux dans le numérique :

- Les métaux à **fort potentiel électrochimique** sont plutôt utilisés dans la fabrication des batteries. En effet ils permettent une différence de potentiel - exprimée en volt (V) - entre les deux électrodes de la batterie comparativement plus important ;
- Les métaux à **permittivité diélectrique élevée**²⁶ sont généralement utilisés dans la confection de condensateurs. En effet, la capacité d'un condensateur à stocker des charges électriques (afin notamment de fournir une stabilité au courant électrique) dépend de sa surface, de son épaisseur et de la permittivité (mesure la capacité d'un matériau à stocker de l'énergie électrique dans un champ électrique) du matériel utilisé. Plus la permittivité est élevée, plus le condensateur peut stocker de charges électriques pour une surface et une épaisseur données ;
- Les métaux **résistants et/ou légers** sont souvent utilisés pour la structure des équipements et au sein d'alliages dans le but de les rendre résistants tout en leur permettant de garder une certaine légèreté ;
- Les métaux **résistants à la corrosion ou à l'usure** servent la plupart du temps en alliage ou en revêtement pour protéger d'autres métaux plus fragiles ;
- Les métaux possédant un **point de fusion élevé** trouvent habituellement une utilité au sein d'alliages pour donner une résistance aux hautes températures ;
- Les métaux **ferromagnétiques** permettent d'ordinaire la fabrication d'aimants puissants et permanents. En effet, le ferromagnétisme est le mécanisme permettant à certains métaux de s'aimanter ;
- Les métaux **très bons conducteurs** sont souvent utilisés comme conducteurs électriques ou en revêtement pour augmenter la conductivité d'un autre métal ;
- Les métaux **semi-conducteurs** sont utiles en l'électronique (circuits intégrés, carte de circuit imprimé, etc.) car ils se comportent tantôt comme des isolants tantôt comme des conducteurs, permettant ainsi de contrôler efficacement le courant électrique ;
- Les métaux **possédant des propriétés optiques** (indice de réfraction très élevé, bon dopant optique, etc.) sont utilisés plutôt pour la confection de fibres optiques ;
- Les métaux **conducteurs électriques transparents** sont généralement utilisés dans les écrans tactiles ;
- Les métaux possédant des **propriétés retardatrices de flammes** sont utilisés comme tels, au sein d'alliages ou non. Les retardateurs de flamme sont des composés chimiques améliorant la réaction au feu des polymères et composites et permettant leur utilisation en conformité avec la réglementation incendie (Ferry et Lopez-Cuesta, 2020).

²⁶ La permittivité diélectrique est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué.

Le Tableau 15 présente les métaux par catégorie de caractéristiques utiles au numérique. Les significations des symboles chimiques sont présentées en Annexe 7.1.

A noter : Ce tableau vise à donner un aperçu des caractéristiques des métaux adaptées au numérique. Il a été complété à partir de ressources bibliographiques et d'entretiens d'experts et n'a pas vocation à être exhaustif.

*Tableau 15 : Caractéristiques recensées des métaux pour application dans le secteur numérique
Sources : Elementarium, Mineral Info, JRC 2023, CRM 2020 Critical Factsheets et CRM 2020 Non-Critical Factsheets*

Caractéristique	Al	Sb	Ag	Co	Cu	Sn	Ga	Ge	In	Li	Mg	Mn	Ni	Au	Pd	Pt	Ru	Si	Ta	Pr, Nd ²⁷	Dy ²⁷	W	Y	Zn
Fort potentiel électrochimique										X														
Permittivité élevée															X					X				
Résistant et/ou léger	X									X	X													
Résistant à la corrosion ou l'usure	X		X	X		X						X	X	X	X	X	X		X			X		X
Point de fusion élevé				X								X	X		X	X	X		X			X	X	
Ferromagnétique				X									X							X	X			
Très bons conducteurs électriques	X		X		X									X										
Semi-conducteurs		X					X**	X	X										X					
Propriétés optiques						X	X	X	X									X		X			X	
Conducteur électrique et transparent						X***			X***															
Retardateur de flammes		X																						

*GaAs

** GaAs et GaN

*** Oxyde d'Indium et d'Etain (ITO)

²⁷ Terres rares légères (Pr, Nd) et lourdes (Dy)

3.1.2. Utilisation des métaux dans les différents composants des équipements numériques

En vertu de leurs caractéristiques présentées en page précédente, les métaux sont utiles dans différentes applications ou composants, listés dans le tableau suivant.

Pour rappel :

- Une carte de circuit imprimé désigne une fine carte en fibre de verre sur laquelle les voies conductrices sont imprimées pour permettre de connecter différents composants tels que des condensateurs, des résistances, des transistors et des circuits intégrés (il peut s'agir de cartes mères, de cartes d'expansions, etc.).
- Un circuit intégré désigne une puce électronique fabriquée à partir d'un semi-conducteur et composée d'un grand nombre d'autres composants électroniques tels que des transistors, condensateurs et des résistances. Ce sont les composants majoritaires de la plupart des équipements numériques.

A noter : Ce tableau vise à donner un aperçu des métaux utilisés dans les composants numériques. Il a été complété à partir de ressources bibliographiques et d'entretiens d'experts et n'a pas vocation à être exhaustif.

Tableau 16 : Métaux utilisés dans les composants numériques. Sources : Elementarium, Mineral Info, JRC 2023, CRM 2020 Critical Factsheets et CRM 2020 Non-Critical Factsheets

Composants	Al	Sb	Ag	Co	Cu	Sn	Ga	Ge	In	Li	Mg	Mn	Ni	Au	Pd	Pt	Ru	Si	Ta	Pr, Nd	Dy	W	Y	Zn
Batterie Li-ion	X			X	X					X	X	X	X					X						
HDD et SSD	X			X								X				X	X	X		X				
Unité de refroidissement	X				X																			
Aimant permanent				X ²⁸			X ²⁹						X ³⁰							X	X			
Carte de circuit imprimé	X	X	X	X	X		X	X					X	X	X	X	X	X	X				X	
Circuit intégré	X	X	X	X	X		X	X					X	X	X	X	X	X	X				X	
Bobine					X								X											
Cable/Connecteur électrique et soudure			X		X	X								X	X									X
Structure des équipements	X	X										X	X											X
Matériel optoélectronique										X									X					
Technologie onde radio et haute fréquence									X			X												
Fibres optiques								X										X		X				
Ecran et écran tactile	X		X			X	X		X									X		X			X	

²⁸ Les aimants samarium-cobalt a été utilisés dans les disques durs, mais sont aujourd'hui remplacés par les aimants au néodyme (Sander et al., 2019), sauf pour certaines applications nécessitant des variations importantes des températures (aéronautique, ...)

²⁹ Le gallium peut être ajouté en petite quantité aux aimants NdFeB, pour améliorer leurs propriétés magnétiques et leur résistance

³⁰ Les aimants Alnico utilisant du nickel représentent une faible part de marché des aimants permanents (Magnetics, 2020)

Dans le domaine du numérique, les métaux jouent un rôle important dans la fabrication de divers composants et technologies. Ils sont **classés en grandes « familles »** en fonction de leurs utilisations spécifiques. Les principales familles identifiées incluent les métaux de structure, les métaux pour la fabrication d'aimants, les métaux de batterie, les métaux semi-conducteurs, les métaux conducteurs, et les métaux pour écrans. Cette catégorisation permet de mieux comprendre et d'optimiser l'utilisation des ressources métalliques dans les innovations technologiques. La figure ci-dessous illustre ces classifications et leur importance dans l'industrie numérique.

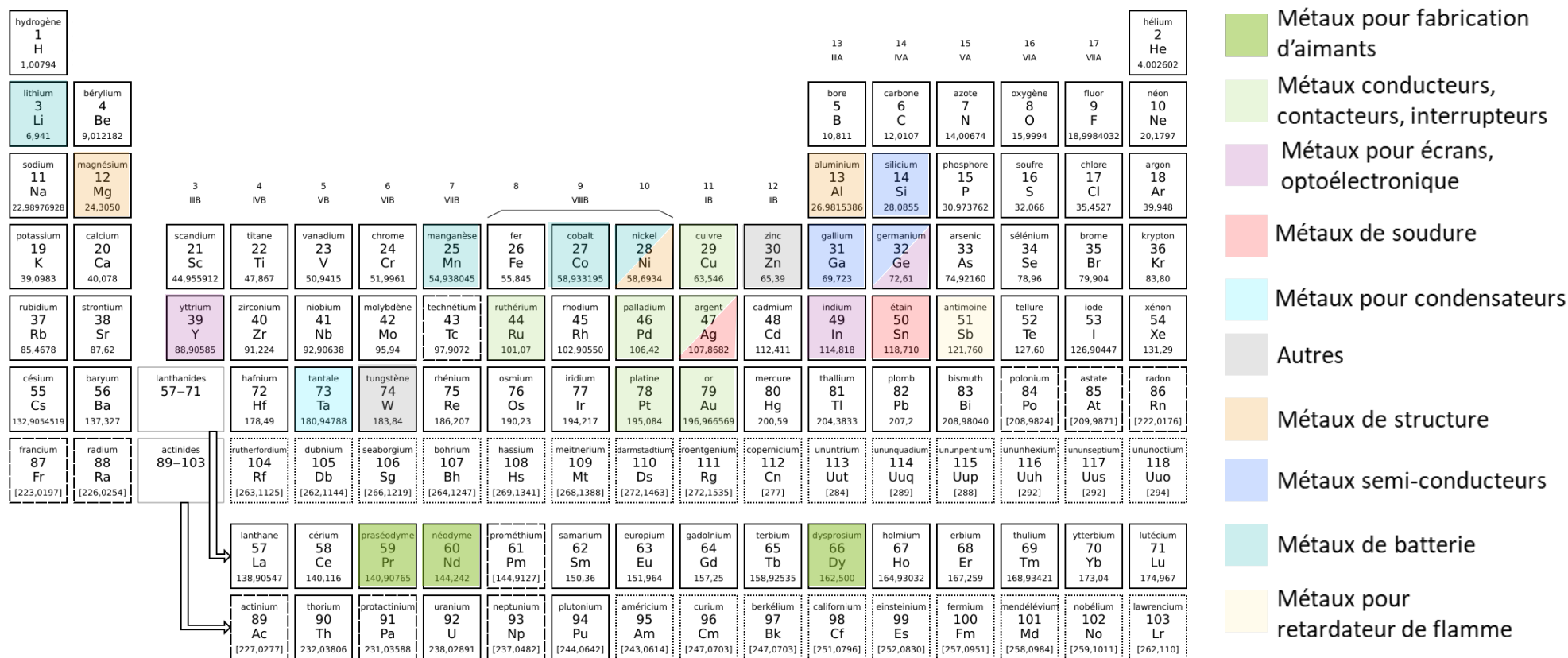


Figure 15 : Classification des métaux en fonction de leurs utilisations dans le domaine numérique

Le Tableau 17 présente, pour 23 métaux³¹, la moyenne du contenu par équipement (colonne 2) pour les équipements pour lesquels un contenu métallique a pu être évalué (colonne 3). Il présente également la **moyenne** de la part de chaque métal dans la masse totale des métaux du périmètre de l'étude (colonne 4) et l'**hétérogénéité** de cette part (colonne 6).

Les métaux sont classés dans l'ordre décroissant du coefficient de variation (colonne 6), qui est une mesure de la variabilité relative : plus il est élevé, plus l'échantillon (ici, la part de chaque métal dans le total des métaux, par équipement) présente une plus grande variation par rapport à sa moyenne. Il est calculé de la manière suivante :

$$\text{Coefficient de variation} = \frac{\text{Ecart type des A\% pour tous les équipements}}{\text{Moyenne des A\% de tous les équipements}} \quad \text{où A\%} = \text{part du métal A dans le total des métaux pour un équipement}$$

Ainsi, les métaux surlignés en vert dans la colonne « Moyenne » sont ceux qui, en moyenne, sont les plus présents dans les équipements numériques, tandis que ceux surlignés en vert dans la colonne « Coefficient de variation » sont les plus uniformément répartis entre les différents équipements numériques.

Tableau 17 : Principaux indicateurs sur le contenu moyen en métaux de vingt équipements numériques (Deloitte, d'après diverses données)

Métal	MOYENNES		INDICATEURS DE DISPERSION		
	Moyenne du contenu métallique par équipement (en g)	Nombre d'équipements pour lesquels des données de composition sont disponibles	Moyenne de la part de chaque métal dans la masse totale des métaux du périmètre de l'étude	Ecart-type (par rapport à la moyenne de la part de chaque métal dans la masse totale des contenus en métaux)	Coefficient de variation
Ni	6,18	16	0,04	0,09	2,48
Ge	0,08	4	0,00	0,01	1,99
Mg	28,37	7	0,08	0,13	1,65
Si	56,44	10	0,25	0,31	1,22
Ta	0,41	5	0,00	0,00	1,16
Ga	0,01	15	0,00	0,00	1,16
Sn	7,98	12	0,03	0,03	1,14
Co	14,45	6	0,05	0,06	1,09
Zn	155,42	8	0,06	0,06	1,05
Y	0,003	12	0,00	0,00	1,04
Sb	2,27	4	0,00	0,00	0,97
Dy	1,11	7	0,00	0,00	0,91
Li	2,81	5	0,02	0,01	0,85
Au	0,67	17	0,00	0,00	0,82
W	0,355	2	0,00	0,00	0,74
Pt	0,03	6	0,00	0,00	0,72
Pd	0,34	12	0,00	0,00	0,70
Al	811,10	18	0,36	0,23	0,66
Pr	1,10	8	0,00	0,00	0,55
In	0,04	12	0,00	0,00	0,55
Nd	4,58	8	0,00	0,00	0,52
Ag	2,39	17	0,00	0,00	0,51
Cu	416,40	17	0,45	0,22	0,49

Ces résultats font émerger plusieurs analyses :

- **Analyse globale** : Les métaux utilisés en faibles quantités pour des fonctions spécifiques (ex. traces d'indium dans les écrans) **semblent être ceux dont la concentration est similaire entre différents équipements** (part dans la masse totale des métaux de l'étude). A l'inverse, les métaux utilisés pour divers usages semblent avoir des concentrations différentes d'un équipement à un autre ;
- **Métaux conducteurs ou pour contact électrique (Ag, Au, Cu, Pd, Pt)** : Ces métaux précieux – sauf dans le cas du cuivre – sont équitablement répartis dans les équipements du numérique, ce qui correspond à leur fonction dans les cartes « logiques », utilisées en traitement de données dans les équipements IT. La moyenne du contenu métallique par équipement est particulièrement

³¹ Aucune composition matière identifiée dans le cadre de l'étude ne contenait de données relatives au ruthénium et une seule a été identifiée pour le manganèse. Ils ne sont donc pas intégrés au tableau.

élevée pour le cuivre – de même pour l’aluminium et le zinc – car certains équipements concentrent des quantités très importantes de cuivre (station de base et serveur) ;

- Terres rares (Nd, Pr, Dy) : Ces métaux sont également répartis équitablement dans les équipements du numérique, ce qui correspond à leur fonction dans les aimants (HDD, haut-parleurs, etc.).
- Si, Ge : Les écart-types des parts de silicium/germanium dans le total des métaux par équipement sont très élevés – et a fortiori leurs coefficients de variation également – car ce sont les seuls métaux du périmètre de l’étude contenus dans les brins de fibre optique. Ainsi, le silicium représente 98,5 % du contenu métallique de la fibre optique contre seulement 0,068 % de celui des stations de base. De son côté, le germanium représente 1,5 % du contenu métallique de la fibre contre 0,002 % de celui d’un serveur.

A noter pour deux métaux :

- Cu : Les données bibliographiques surestiment (téléviseurs, consoles) ou sous-estiment (box internet et TV) certains contenus par équipement, par rapport aux données de caractérisation transmises.
- Ta : Il est présent en particulier dans les filtres de radiofréquence des équipements communicants. La quantité de tantale contenue dans les ordinateurs portables (d’après une source bibliographique) est surestimée par rapport aux données de caractérisation transmises par un acteur de l’industrie du recyclage – cf. Tableau 11.

3.1.3. Part du numérique dans les secteurs utilisateurs des métaux de l’étude

La Figure 16 présente en ordonnées la demande mondiale d’un métal utilisé dans le secteur du numérique, et en abscisses la part du numérique dans la demande mondiale de ce métal selon Malmodin et al. (2018). Le silicium, le ruthénium et le magnésium n’ont pas été intégrés au graphique car certains indicateurs ne sont pas disponibles pour ces métaux.

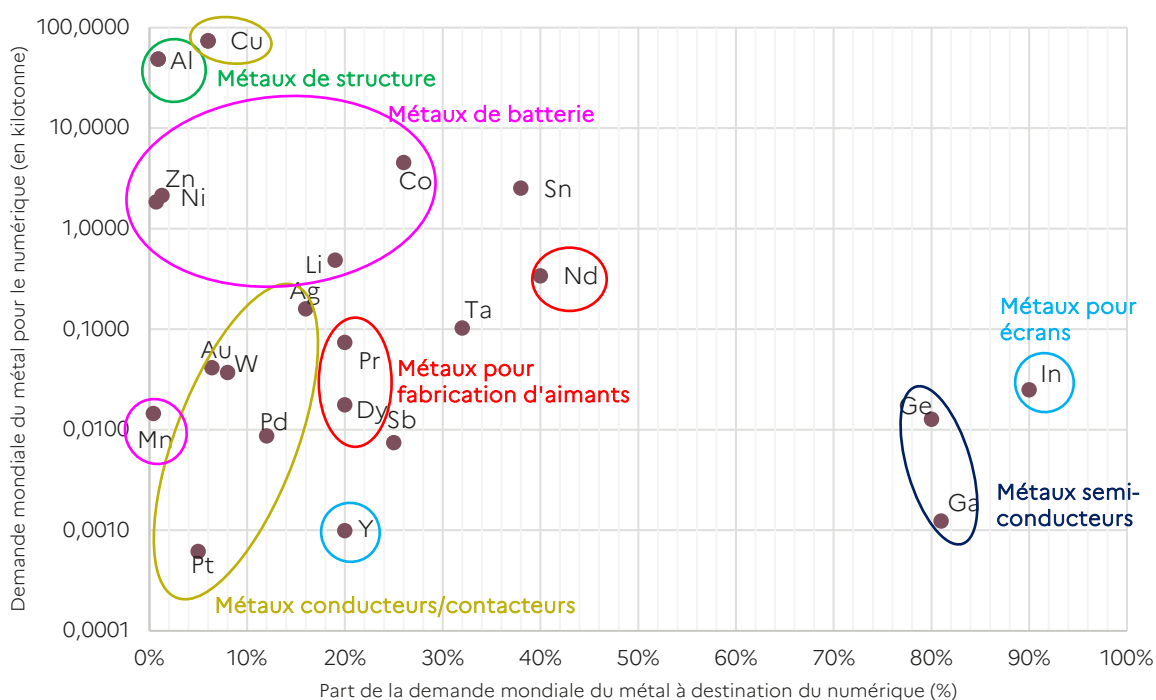


Figure 16 : Part du numérique dans les secteurs utilisateurs pour les métaux du périmètre de l’étude (Deloitte, d’après diverses données ; Malmodin et al., 2018)

Ce graphique fait émerger plusieurs analyses :

- La demande mondiale en métaux pour écrans (indium) et en métaux aux propriétés semi-conductrices (gallium, germanium) est majoritairement destinée au secteur numérique. Cela pourrait indiquer un **risque en termes d'approvisionnement si leur production est perturbée** ;
- Certains métaux comme le cuivre (Cu) et l'aluminium (Al) représentent les quantités demandées les plus élevées pour le numérique parmi les métaux analysés. En revanche la part du secteur numérique dans les secteurs utilisateurs est faible. Cela indique leur **importance commune à différentes industries** ;
- Les métaux précieux (dont les métaux conducteurs) et semi-conducteurs représentent des quantités demandées par le secteur numérique relativement faibles, par comparaison aux autres métaux du périmètre de l'étude. Dans le cas des métaux précieux, leur utilisation peut notamment être freinée par un **prix élevé**.

3.1.4. Principales tendances affectant le besoin en métaux du secteur du numérique

Tendances globales

Plusieurs tendances générales d'utilisation des métaux par les équipements numériques ont été identifiées via la recherche bibliographique et les entretiens menés au cours de l'étude.

Miniaturisation des équipements et des composants

Equipements : Plusieurs fabricants ont évoqué une tendance générale de miniaturisation des équipements fabriqués (ex. box) (Entretien avec un fabricant d'équipements numériques, 2023).

Composants : Les composants se miniaturisent pour des capacités de calcul de plus en plus importantes. Cela induit des CPU de plus en plus puissants, ce qui requiert des volumes plus importants de métaux (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024).

Ces deux tendances impliquent :

- Une **baisse des quantités de métaux utilisés par équipement** ;
- Une **diversification des métaux utilisés**. Par exemple, pour les objets connectés IoT, la complexification des composants et équipements liée aux nouvelles fonctionnalités de l'IoT impliquent de plus en plus de matériaux différents utilisés. C'est le cas des composants « mémoire et logique » (ex. DDR SDRAM, SSD, microcontrôleurs, radios hors puissance, etc.). (Mavana et Bol, 2023)

Hausse de la consommation d'équipements du secteur du numérique dans le monde

Les différents scénarios prospectifs indiquent tous une **hausse de la consommation d'équipements du secteur du numérique** dans le monde, qui entrainerait du même coup une hausse de l'utilisation de métaux dans ce secteur (Etienne Lees-Perasso, 2023). Par ailleurs, pour certains équipements, on assiste à un **raccourcissement des cycles de vie des produits**, ce qui contribue à poursuivre la hausse des flux d'équipements produits annuellement (remarque du COPIL).

En particulier, pour toutes ses applications, **l'IoT, est considéré comme l'un des sous-secteurs qui permet de maintenir une croissance** dans le secteur des équipements du numérique, alors que les marchés pour les autres équipements sont relativement saturés. Le nombre d'équipements IoT devrait donc augmenter d'ici 2030/2050. Même dans un scénario frugal, le nombre d'équipements IoT ne diminuerait pas. Dans d'autres scénarios, les ventes d'équipements IoT pourraient augmenter de manière exponentielles (x 4, x 16) (Mavana et Bol, 2023).

D'autres segments du numérique sont également en croissance tels que les data centers (serveurs et dispositifs de stockage), les stations de base 4G/5G, l'edge computing et les réseaux de diffusion de contenu (CDN).

Les résultats de l'analyse prospective en matière de nombre et types d'équipements en 2030 et en 2050 sont présentés en détail en section 5.1.2.1.

Hausse de l'utilisation de métaux dans le secteur du numérique

Dans un scénario tendanciel, **les besoins en métaux du numérique devraient augmenter** pour tous les métaux du périmètre de l'étude (hors prise en compte de phénomènes de substitution).

Cette hausse pourrait néanmoins atteindre un plafond, notamment car **l'offre de composants pourrait augmenter moins rapidement que la demande**. Par exemple, la hausse des besoins en semi-conducteurs pourrait entrainer des ruptures d'approvisionnement, comme cela s'est produit pour les semi-conducteurs taiwanais en 2021 (Etienne Lees-Perasso, 2023).

Tendances liées aux compositions métalliques

A ces tendances globales s'ajoutent des **tendances liées aux compositions métalliques**, que ce soit par composant (substitution des dispositifs de stockage HDD par des SSD, densification des modules, puces et microprocesseurs, etc.) ou par métal (ex. réduction de la concentration unitaire en aluminium ou en or). Ces variables à horizon 2030/2050 sont présentés en section 5.1.1.2.

3.2. Cartographie de la chaîne de valeur des métaux

3.2.1. Étapes de transformation considérées

Les métaux sont extraits à différents endroits du globe, subissent des étapes de transformation qui leurs sont propres avant intégration dans un équipement numérique. Ils ont par conséquent une chaîne de valeur qui leur est spécifique. Nous proposons cependant de suivre une typologie d'étapes de transformation pour utilisation dans le secteur numérique en nous appuyant sur le modèle du Joint Research Center (JRC, 2023) – cf. Figure 17, selon la méthodologie détaillée en section 2.1.1.



Figure 17 : Etapes de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le secteur numérique, adaptées du JRC (2023)

*La partie fin de vie, regroupant la collecte, le tri et la valorisation des métaux en recyclage, est détaillée en section 4.

3.2.1.1. Matière première

Ressources et réserves :

Les matières premières métalliques sont présentes dans la croûte terrestre à différentes concentrations. Les quantités exploitables³² de ces matières relèvent de différentes catégories :

- **Ressources minérales**, qui sont une concentration ou une occurrence de matériaux solides d'intérêt économique sous une forme, une qualité et une quantité tels qu'il existe des perspectives raisonnables d'extraction économique éventuelle. L'emplacement, la quantité, la catégorie (ou la qualité), la continuité et d'autres caractéristiques géologiques d'une ressource minérale sont connus, estimés ou interprétés à partir de preuves et de connaissances géologiques spécifiques, y compris l'échantillonnage. Les ressources minérales sont sous-divisées, par ordre d'accroître la confiance géologique, en catégories inférées, indiquées et mesurées (JORC, 2012) ;
- **Réserves**, qui « se distinguent des ressources minérales par le fait qu'elles ont été identifiées et sont considérées comme économiquement exploitables. L'estimation des réserves se fait sur la base de critères économiques (cours des métaux, taux de change, coût d'extraction, etc.), de contraintes commerciales et environnementales mais aussi des techniques d'exploitation et de traitement » (Drapeau, 2020).

La Figure 18 illustre la différence entre réserves et ressources dans le cas du cuivre, notamment estimées par l'USGS (Johnson et al, 2014).

³² Ni les ressources, ni les réserves, ne correspondent à la quantité totale d'un métal sur terre

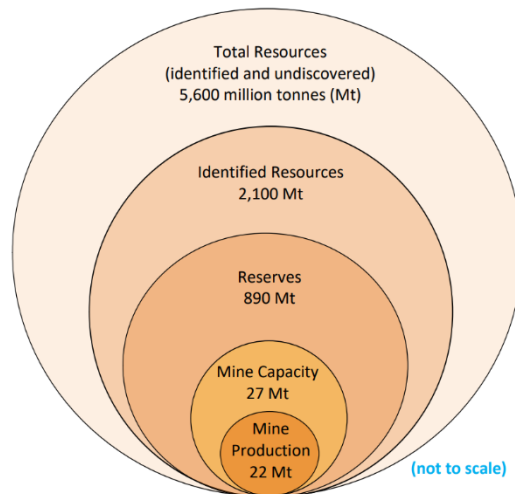


Figure 18 : Production et réserves mondiales de cuivre en 2022 (ICSG, 2023)

Les étapes d'extraction du minerai, minéralurgie et métallurgie détaillées ci-dessous sont également présentées en Figure 8.

Extraction : Sachant que les différents métaux se trouvent mélangés en plus ou moins grande concentration au sein de minerais, on extrait ces minerais à l'aide de quatre principaux types de mines :

- Les mines souterraines ;
- Les mines à ciel ouvert ;
- Les exploitations à extraction par lixiviation (consistant à injecter, dans le gisement, une solution dissolvant les minerais puis à pomper cette solution vers la surface) ;
- Les exploitations de placers (du mot espagnol *placer* qui signifie « sable alluvial » ; matière formée par l'accumulation de sédiments au cours de leur transport, par un cours d'eau par exemple dans le cas de l'or).

Le choix du type de mine dépend des différents paramètres du gisement (profondeur, géométrie, concentration en minerais recherchée, etc.). On peut aussi trouver certains métaux sous forme de sels dans des lacs salés où l'on exploite alors les saumures pour les récupérer.

Minéralurgie : Une fois le minerai récupéré, celui-ci doit être traité pour obtenir un minerai concentré. Les étapes de traitement du minerai sont souvent effectuées à proximité de la mine et, bien que pouvant être très différentes d'un minerai à l'autre, elles suivent généralement les mêmes grandes étapes dans l'ordre suivant :

- Traitement mécanique : Concassage et broyage du minerai en petites particules, dont la taille est déterminée à partir d'observations minéralogiques et de tests en laboratoire. Cette étape permet de séparer au mieux les minéraux valorisables de la gangue³³ et des « stériles » (ensemble de roches sans intérêt économique présent dans les minerais) et de produire une poudre plus réactive aux prochaines étapes ;
- Séparation du minerai et de la gangue à travers divers procédés physiques ou physico-chimiques selon le minerai ; flottation par moussage, magnétisme, etc.

Métallurgie : Le métal recherché peut être obtenu suivant différents degrés de pureté, en fonction du besoin dans l'équipement final, via trois méthodes principales de raffinage (CGDD, 2023), qui peuvent être combinées – exemple en 4.1.3 :

- **L'hydrométallurgie** : utilisation de réactions chimiques pour extraire les métaux des minerais, en dissolvant (lixiviant) les métaux contenus dans le minerai, puis en exploitant les différences de solubilité et propriétés électrochimiques de ces métaux une fois dissous ;

³³ Matière sans valeur qui entoure un minerai à l'état naturel

- **La pyrométallurgie** : traitement thermique du métal afin de le séparer des autres éléments du minerai, en particulier pour réduire les minerais oxydés. Certains minerais ne sont pas oxydés mais sulfurés (nickel ou cuivre par exemple) ;
- **L'électrométallurgie** : utilisation de l'énergie électrique soit pour alimenter les fours dans des procédés thermiques, soit pour produire une réaction chimique d'électrolyse³⁴.

A noter que ces procédés peuvent être également utilisés dans le recyclage des métaux issus de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) du secteur numérique.

3.2.1.2. Matériau transformé

Le JRC (2023) décrit les matériaux transformés comme :

- Une combinaison de deux matériaux ou plus (par exemple, des alliages ou des poudres mélangées) ;
- Un matériau relativement pur qui a été transformé (par moulage, laminage, découpage, etc.) d'une manière spécifique en vue de son utilisation ultérieure pour fabriquer une partie d'un équipement (produits semi-fabriqués ou semi-finis).

Dans le cas du secteur numérique, il peut s'agir de la résine epoxy, d'alliages NdFeB pour aimants permanents, ou les alliages et produits semi-finis d'aluminium. Dans le cas d'une batterie Li-ion de smartphone, le matériau transformé, l'oxyde de lithium cobalt (LCO), intègre du lithium.

3.2.1.3. Composant

Les **composants** sont la plus petite partie d'une technologie qui est fabriquée et commercialisée par une entreprise à partir de matériaux transformés (JRC, 2023). Dans le cas du secteur numérique, il peut s'agir de condensateurs, d'aimants permanents NdFeB, de circuits intégrés (« puces électroniques ») à transistor de dimension <10 nm ou de dimension >45 nm par exemple. Dans le cas d'une batterie Li-ion de smartphone, la cathode c'est-à-dire le composant, intègre un matériau transformé, l'oxyde de lithium cobalt (LCO).

3.2.1.4. Assemblage

Le composant est ensuite incorporé à un **assemblage**, soit un ensemble de composants achetés par une entreprise, assemblés et vendus à d'autres entreprises. Dans ce processus, une entreprise peut également utiliser des matériaux transformés pour fabriquer certaines pièces (JRC, 2023). Dans le cas du secteur numérique, l'assemblage peut être par exemple un processeur (*CPU – Central Processing Unit*) d'un écran LCD ou d'une batterie Li-ion. Dans le cas d'une batterie Li-ion de smartphone, l'assemblage intègre une cathode LCO, le composant.

3.2.1.5. Equipement

L'assemblage est alors incorporé à un **équipement numérique** (ou super-assemblage), un ensemble d'assemblages et de composants achetés par une entreprise, assemblés et vendus à d'autres sociétés (JRC, 2023). Dans le cas d'une batterie de smartphone, la batterie Li-ion (assemblage) est incorporée à un smartphone (le super-assemblage).

³⁴ « L'électrolyse est un procédé dans lequel un courant électrique circule entre deux électrodes dans une solution qui contient le métal recherché. La circulation du courant conduit les métaux à se déposer sur l'électrode négative (la cathode), ce qui permet son extraction, à la suite de sa dissolution et sa purification par hydrométallurgie » (CGDD, 2023)

3.2.2. Constats issus de la cartographie des chaînes de valeur et concentration de la production

La Figure 19 en page suivante est une cartographie mondiale de l'extraction des métaux stratégiques pour le secteur numérique, qui montre les principaux pays producteurs de métaux clés en 2022. Les pays colorés en bleu clair sont les principaux producteurs d'au moins un métal de l'étude, alors que les pays colorés en turquoise foncé ne sont les premiers producteurs d'aucun des 25 métaux. Les noms de métaux en rouge correspondent aux cinq métaux du périmètre d'étude les plus critiques – cf. Figure 20.

L'exercice de cartographie a permis d'établir une chaîne de valeur simplifiée pour chacun des métaux du périmètre d'étude, selon la méthodologie détaillée en section 2.1.1.

La Chine domine largement l'extraction des métaux, étant producteur minier de la totalité des métaux de l'étude à l'exception des platinoïdes (Pd, Pt et Ru). Cette position dominante peut également s'étendre à la **production de composants électroniques**, où la Chine joue un rôle prépondérant³⁵. L'Europe, le Japon, la Russie et les États-Unis sont également présents à cette étape de la chaîne de valeur.

Pour **dix métaux** du périmètre d'étude, **un seul pays est en situation de quasi-monopole pour leur extraction**, représentant plus de 65 % de la production minière mondiale :

- Cobalt : La République Démocratique du Congo (RDC) extrait 68 % du cobalt mondial.
- Dysprosium : La Chine est responsable de 70 % de l'extraction mondiale.
- Gallium : La Chine domine avec 98 % de l'extraction.
- Germanium : La Chine extrait 68 % du germanium mondial.
- Néodyme : La Chine en extrait 70 %.
- Platine : L'Afrique du Sud extrait 74 % du platine mondial.
- Praséodyme : La Chine est responsable de 70 % de l'extraction.
- Ruthénium : L'Afrique du Sud domine avec 90 % de l'extraction mondiale.
- Tungstène : La Chine extrait 84 % du tungstène mondial.
- Yttrium : La Chine en extrait 70 %.

Plus en aval de la chaîne de valeur, **la production de terminaux est largement localisée en Asie** (AFNUM, 2024). L'étude de Carrara, S. et al. (2023) confirme cette conclusion sur la chaîne de valeur des équipements utilisés en datacenter, et des smartphones, tablettes et ordinateurs portables.

³⁵ Un exemple marquant est la maîtrise de la chaîne de valeur des aimants permanents par la Chine. La concentration de la production en Chine augmente à chaque étape en aval, passant de 58 % de l'exploitation minière mondiale annuelle des terres rares en 2020 à une part de 92 % de la production mondiale annuelle d'aimants, l'étape avec la plus haute valeur ajoutée (US Department of Energy, 2022).

Légende :

Métaux surlignés en rouge : Métaux les plus critiques d'après l'étude.

Pays colorés en bleu clair : Principaux producteurs d'au moins un métal de l'étude.

Pays colorés en turquoise foncé : Pays n'étant pas les premiers producteurs d'aucun des 25 métaux.

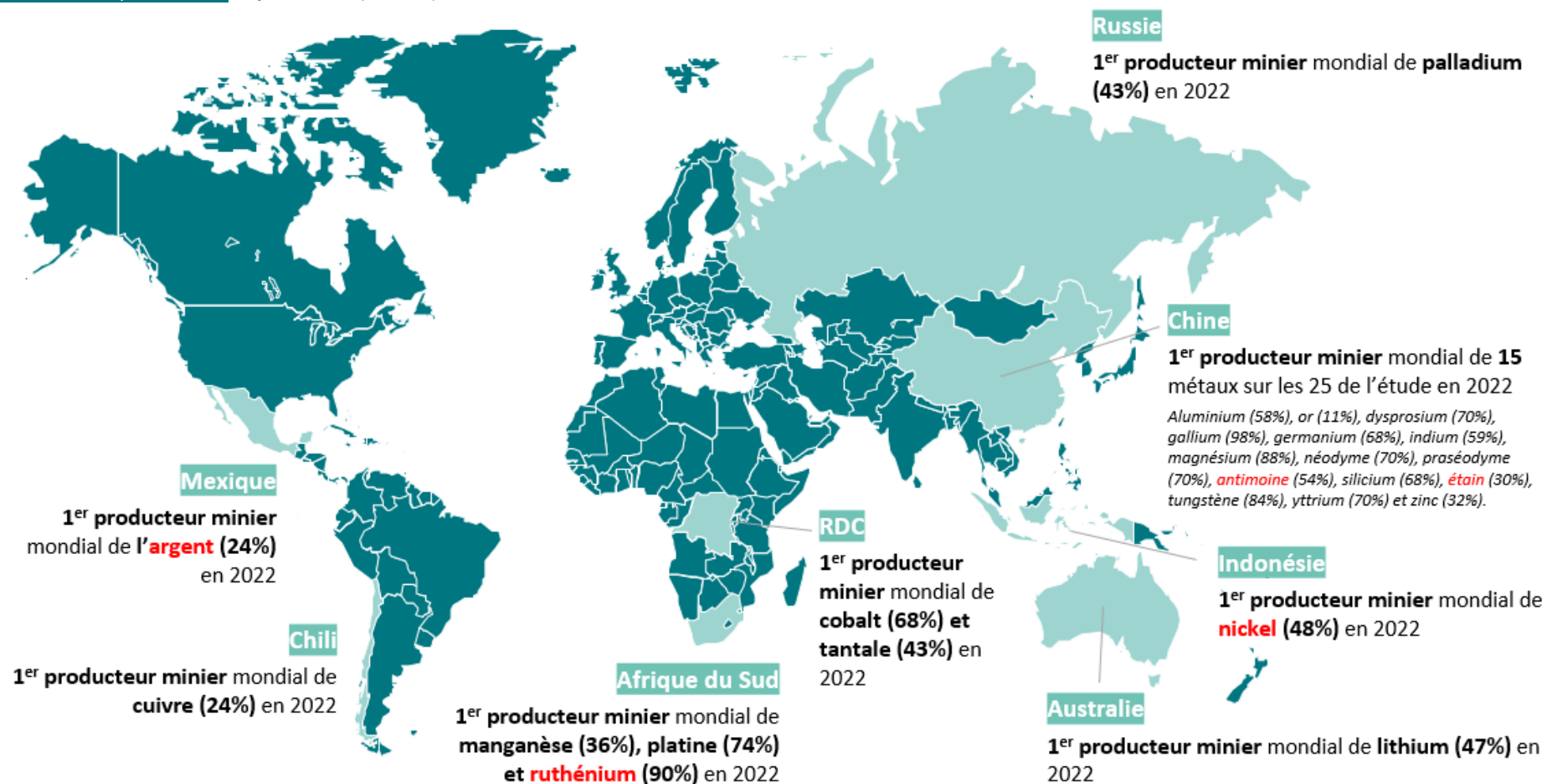


Figure 19 : Cartographie mondiale de l'extraction des métaux stratégiques pour le secteur numérique (Deloitte, d'après diverses sources dont USGS)

3.3. Evaluation de la criticité des métaux du périmètre d'étude

3.3.1. Classement des métaux en termes de criticité

La Figure 20 ci-dessous présente le **score de criticité total sur 30** pour différents métaux, illustrant les niveaux de criticité relatifs de chaque métal. Le score total de criticité par métal est calculé en additionnant les scores de criticité (notés sur 5) pour chacun des six indicateurs présentés section 2.1.2. : longévité des réserves connues ; incertitude sur la disponibilité du métal ; risques géopolitiques de l'approvisionnement ; volatilité du prix du métal ; performance environnementale de la production minière ; performance sociétale de la production minière.

Cette évaluation permet de comparer les risques d'approvisionnement et les risques socio-environnementaux associés à chaque métal. En particulier, trois métaux ont des scores de criticité élevés :

1. Le score de criticité le plus élevé est attribué à **l'étain** (Sn) pour lequel les risques géopolitiques d'approvisionnement sont élevés, du fait de la concentration de sa production dans de nombreux pays à l'indice WGI³⁶ faible (par ex. Myanmar, République Démocratique du Congo), et du très fort déficit d'approvisionnement anticipé, et du risque sur la longévité des réserves connues. Gregoir et van Acker (2022) citent comme déterminant majeur de la croissance de la demande d'étain la croissance historique et attendue du secteur numérique. L'étude a permis d'identifier en particulier son utilisation dans les alliages de brasage de circuits imprimés, et dans les écrans tactiles sous forme d'oxyde d'indium et d'étain (ITO) ;
2. **L'argent** (Ag) est en deuxième position, et présente des risques géopolitiques d'approvisionnement moindres, mais un impact environnemental de l'extraction plus élevé, par exemple lié à l'utilisation de mercure dans les mines artisanales (SCRREEN, 2020). L'étude a permis d'identifier son utilisation en particulier comme commutateur et dans les cartes électroniques, du fait de ses propriétés conductrices et de résistance à la corrosion ;
3. Le **ruthénium** (Ru), en troisième position, présente un score de criticité total de 17, se distinguant par un impact environnemental de l'extraction particulièrement élevé. Cependant, il présente un faible risque sur la longévité des réserves connues, contrastant avec l'étain et l'argent. L'étude a permis d'identifier son utilisation dans les couches et sous-couches magnétiques sur les disques durs pour les applications de stockage de données, comme pâte en couches épaisses et résistives, dans les résistances à puce et les circuits électroniques intégrés hybrides, et sous la forme de sels organométalliques pour les applications de revêtement dans les puces mémoires de dernière technologie.

Parmi ces trois métaux, seul le ruthénium (groupe des platinoïdes) est reconnu comme critique et stratégique par le « Critical Raw Materials Act ».

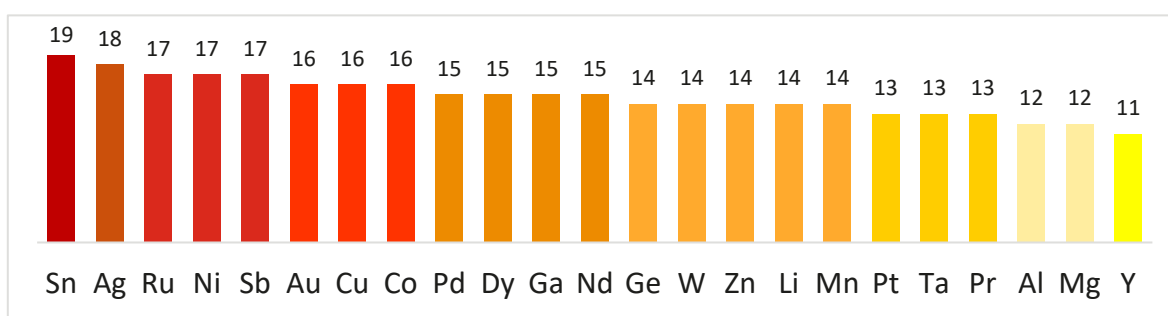


Figure 20 : Score de criticité total sur 30 par métal
(hors silicium et indium car certains indicateurs ne sont pas disponibles pour ces métaux)

Les autres métaux affichent des scores de criticité variés, allant de 11 pour l'yttrium (Y) à 17 pour le ruthénium (Ru), le nickel (Ni) et l'antimoine (Sb). Les six critères évalués (cf. ci-dessus) et la méthodologie de notation sont présentés en section 2.1.2.

³⁶ Cf. Tableau 6

La Figure 21 présente le score de criticité total sur 30 par métal, ainsi que les scores des six indicateurs retenus dans le cadre de l'étude.

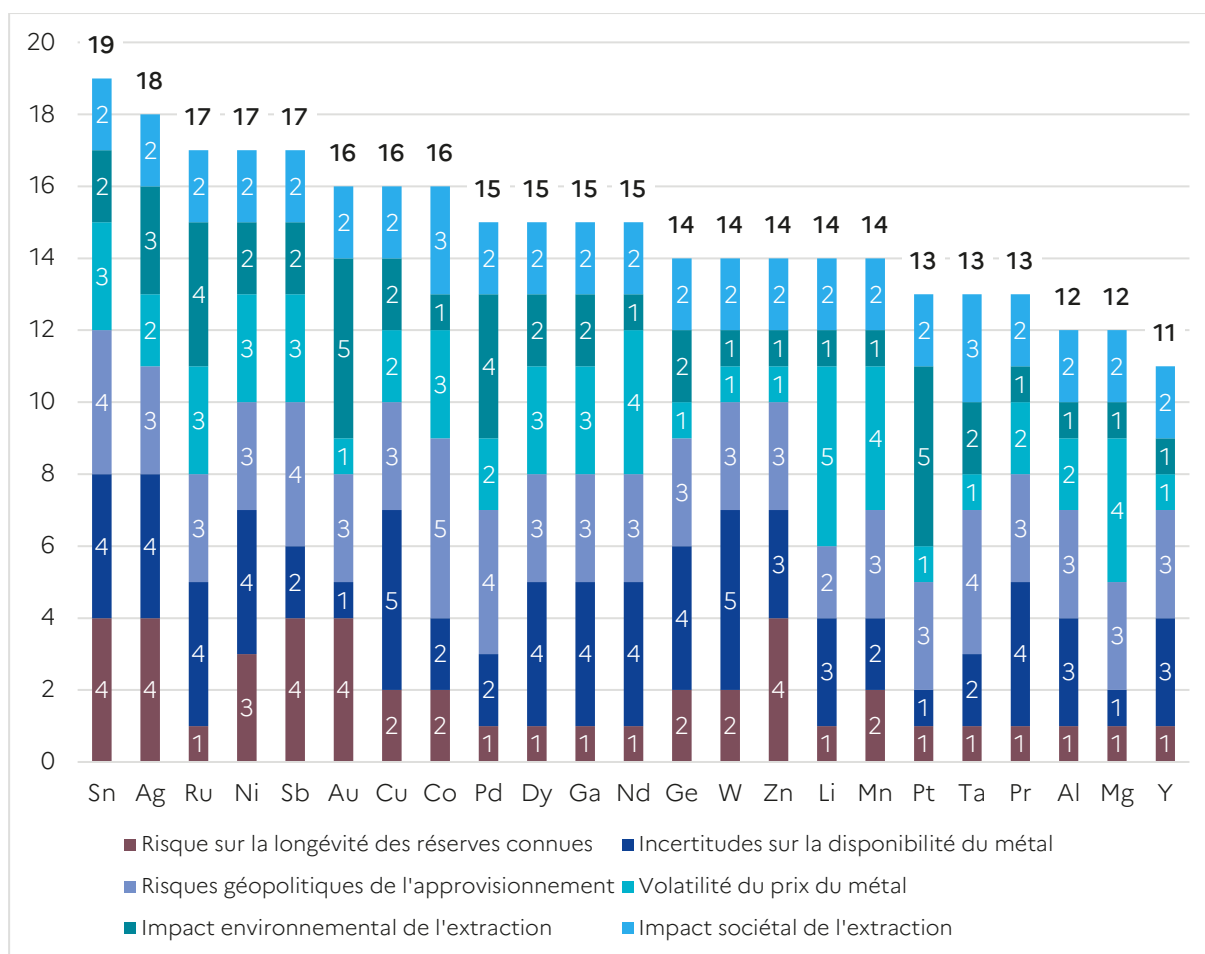


Figure 21 : Score de criticité par métal – Résultats totaux et par indicateur (hors silicium et indium car certains indicateurs ne sont pas disponibles pour ces métaux)

A noter : En complément de ce « score brut », chaque fiche métal indique :

- Un « **niveau de criticité par rapport aux 25 métaux étudiés** » de 1/5 (faible criticité) à 5/5 (criticité très élevée) ;
- Le **détail des six scores** pour chaque métal, ainsi que des analyses par métal.

3.3.2. Mise en perspective des risques socio-environnementaux identifiés

Les impacts environnementaux liés à la production de certains métaux sont reflétés dans la notation en Figure 20 selon la méthodologie exposée en 2.1.2. C'est par exemple le cas des platinoïdes, dont l'extraction est associée à un risque de drainage minier acide (SCRREEN 2023). La consommation d'électricité pendant l'extraction et l'enrichissement du minerai est le principal impact environnemental (72 %) de la production de platinoïdes, en raison de la faible teneur du minerai, de la forte demande d'électricité dans les mines et les concentrateurs, des conditions d'extraction difficiles et de la prédominance du charbon dans le réseau de distribution d'électricité sud-africain qui représente 72 % de l'extraction minière mondiale (European Commission, 2020).

Parmi les métaux de l'étude, les **cinq métaux dont l'impact environnemental est le plus fort** (Graedel, 2015) sont les suivants :

1. L'or (score de 5/5) ;
2. Le platine (score de 5/5) ;
3. Le palladium (score de 4/5) ;

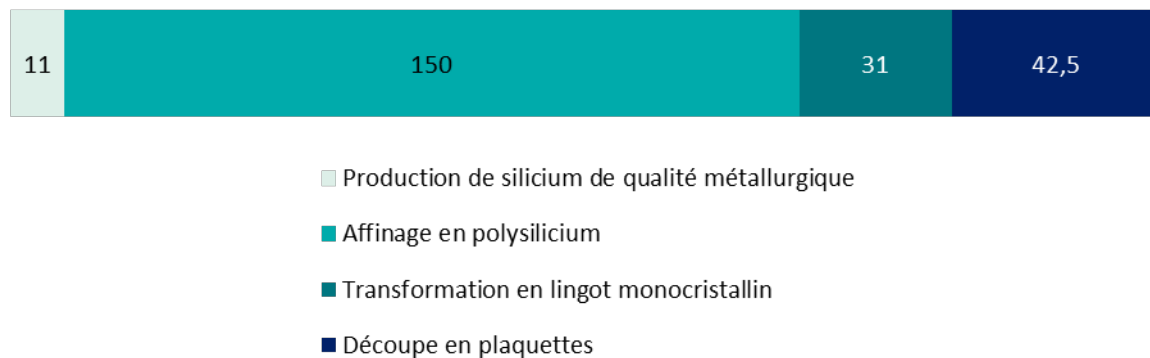
4. Le ruthénium (score de 4/5) ;
5. L'argent (score de 3/5).

A noter qu'un approfondissement est nécessaire pour identifier les impacts environnementaux spécifiques à chaque métal, qui ne sont pas toujours reflétés dans cette notation. Par exemple, concernant le lithium, la disponibilité en eau douce et la concurrence sur l'accès à l'eau représentent un risque élevé pour l'exploitation de ce métal s'il est extrait sous forme de saumure. Dans la région andine du Chili, de la Bolivie et de l'Argentine, l'extraction du lithium nécessite une quantité relativement importante d'eau souterraine dans l'une des régions désertiques les plus sèches du monde pour pomper les saumures des puits forés (SCRREEN, 2023).

Cependant, dans le cadre spécifique du secteur numérique, l'évaluation des impacts environnementaux ne doit pas se limiter aux activités extractives, mais à l'ensemble des procédés utilisés dans la chaîne de valeur des équipements. Un aspect crucial de cette phase est le raffinage des métaux à un degré de pureté élevé, nécessaire pour leur utilisation dans les équipements numériques.

La Figure 22 ci-dessous illustre l'apport d'électricité nécessaire par étape de production de silicium de grade électronique (Si EG) en MWh/ tonne. L'affinage en polysilicium est la phase de production de Si EG la plus énergivore, nécessitant 150 MWh/ tonne, ce qui représente 64 % de la consommation électrique totale pour la production de Si EG (Mineral info, 2020). Les procédés de raffinage du silicium métal (procédé de Czochralski, méthode de la zone fondue) sont également utilisés pour la production d'autres métaux de nécessitant une pureté importante pour utilisation dans des applications numériques (par ex. gallium, germanium). Ces procédés de raffinage, essentiels pour atteindre la pureté requise, contribuent de manière significative aux impacts environnementaux associés à la fabrication des composants électroniques dans le secteur du numérique.

Figure 22 : Apport d'électricité nécessaire par étape de production de Si EG en MWh/t (Mineral Info, 2020)



Par ailleurs, la diminution de la taille des circuits intégrés serait associée à une hausse des impacts environnementaux associés à leur production (Pirson et al, 2023), ce qui pourrait s'expliquer par l'introduction de procédés plus exigeants pour la production de semi-conducteurs les plus avancés, comme la lithographie extrême ultraviolet EUV. Ce constat est à mettre en perspective avec la tendance identifiée en 3.1.4 de miniaturisation des composants utilisés dans les équipements.

La hausse de la production de semi-conducteurs à horizon 2030 au sein de l'UE, pour atteindre une part de 20 % de la production mondiale tel que prévu par le « règlement sur les puces »³⁷, pourrait induire une hausse significative d'émissions par ce secteur d'activité. Les émissions de GES induites pourraient être supérieures à celles du secteur de l'aviation ou de l'acier (Hess, 2024).

³⁷ Tel que proposé dans la « COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ DES RÉGIONS Une boussole numérique pour 2030: l'Europe balise la décennie numérique ».

3.3.3. Mise en perspective des risques géo-économiques identifiés

- L'impact du prix des métaux sur la production d'équipements est négligeable

Les entreprises affiliées à l'AFNUM, représentant les producteurs de la quasi-totalité des équipements du périmètre d'étude, produisent principalement en Asie³⁸. De ce fait, les problèmes liés aux restrictions d'exportation de métaux imposées par la Chine sont atténués, car les matières premières sont disponibles sur place. En conséquence, **les adhérents de l'AFNUM n'ont globalement pas fait état d'une tension d'approvisionnement** (AFNUM, 2024).

La prise en compte des tensions d'approvisionnement en métaux par le secteur du numérique contraste donc avec d'autres secteurs, en particulier en comparaison avec le secteur automobile³⁹. En effet, à ce jour, **les prix des métaux peuvent augmenter drastiquement sans que cela ait d'impact sur les prix des composants et donc des équipements**. En effet les producteurs d'équipements numériques auraient la capacité d'absorber les hausses de prix des métaux, mieux que dans d'autres secteurs utilisateurs des mêmes métaux. Plusieurs raisons ont été identifiées :

- Les métaux entrant dans la composition des équipements ne constituent qu'une **faible part des coûts de production**. Dans le cas des équipements IoT à coûts élevés, le prix des métaux n'est pas déterminant par rapport aux marges commerciales, ou des coûts fixes de R&D par exemple (Mavana et Bol, 2023). Les métaux déterminent moins le prix des équipements que la fonction du produit, les aspects de propriété intellectuelle, etc. (Entretien avec un fabricant d'équipements numériques, 2023). ;
- Les **faibles quantités de métaux en jeu**. La consommation totale de gallium ne s'élève probablement qu'à quelques kilogrammes par an (lors du dopage d'un semi-conducteur, la quantité de gallium utilisée est généralement de l'ordre du microgramme ou du nanogramme). Par conséquent, le prix du gallium n'a pas d'importance dans la fabrication des composants. Cette affirmation peut être cependant nuancée dans le cas de métaux particulièrement coûteux comme l'or ou le platine de haute qualité, ce qui incite à réduire leur utilisation dans les processus de fabrication. Les puces électroniques peuvent nécessiter des tonnes d'or par an à l'échelle mondiale (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024).
- **Pour le numérique, les tensions d'approvisionnement sont davantage liées au manque de disponibilité des métaux pour les fabricants de composants européens. Cela soulève deux défis pour les pays européens : la diversification des sources d'extraction minière et le développement de capacités d'affinage des métaux.**

La disponibilité des métaux affecte davantage les approvisionnements en métaux pour les fabricants de composants électroniques que leur prix. Lorsque des restrictions commerciales sont mises en place dans des pays en quasi-monopole dans l'extraction et/ou l'affinage des métaux (ex. 98 % de l'extraction de gallium par la Chine), alors les approvisionnements des fabricants européens de composants électroniques sont en **risque de tension** (remarque du COPIL).

Si, à court terme, les producteurs d'équipements interrogés peuvent être vulnérables aux effets induits par des ruptures d'approvisionnement (Entretien avec un fabricant d'équipements numériques, 2023), à **moyen terme**, ils estiment néanmoins que **la demande du secteur numérique serait suffisante pour justifier l'ouverture de mines et d'usines d'affinage**. Cependant, les étapes pour tester et confirmer la

³⁸ Cette tendance a été confirmée par le COPIL. Selon un expert du numérique, la Chine n'est pas uniquement un acteur majeur de l'extraction des métaux, mais se positionne également comme leader dans les activités en aval de l'extraction, comme le raffinage des métaux et la fabrication d'équipements, qui représentent une valeur ajoutée très élevée (remarque du COPIL).

³⁹ La prise de conscience de ces enjeux progresse parmi les acteurs du numérique, notamment depuis l'annonce de restrictions à l'exportation de la Chine (ex. gallium, germanium), notamment portée par la Délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques (DIAMMS).

viabilité d'un projet minier peuvent prendre plusieurs années⁴⁰, tandis qu'un délai supplémentaire est nécessaire pour mettre en place des raffineries et des fonderies afin d'atteindre le niveau de pureté requis (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024).

Les enjeux d'approvisionnement sont par ailleurs plutôt liés à l'affinage des métaux pour un usage numérique : le marché des métaux de très haute pureté est caractérisé par un **nombre limité d'acteurs capables de raffiner ces métaux aux niveaux requis par le secteur numérique**. Les prix des métaux raffinés traduisent l'importance de cette étape de la chaîne de valeur des équipements. Pour l'industrie des semi-conducteurs, le prix des métaux utilisés est fortement influencé par le processus de purification, plutôt que par la phase d'extraction. Par exemple, le prix du gallium augmente considérablement à cette étape, passant de 40-50 USD/kg lors de l'extraction à 1 000 USD/kg une fois qu'il a été raffiné à un niveau de pureté convenant aux applications numériques (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024).

Ainsi, **le goulot d'étranglement se situerait plutôt au niveau des processus de production de composants** (ex. semi-conducteur) que des matériaux qu'ils contiennent. L'augmentation des capacités de production des principaux fabricants de semi-conducteurs (Chine, Taiwan⁴¹, Corée du Sud, Etats-Unis) est un processus long. C'est en particulier le cas pour les technologies de pointe, telles que les gravures⁴² effectuées à Taiwan (Etienne Lees-Perasso, 2023).

⁴⁰ Etude conceptuelle et étude préliminaire : environ 1 an ; Etude de pré faisabilité : entre 1 et 3 ans ; Etude de faisabilité : entre 2 et 5 ans ; Construction avec démarrage de la production : entre 6 et 10 ans (Mineral Info, 2017).

Ces délais peuvent être plus long en Europe, où les riverains peuvent être amenés à refuser un projet minier à proximité de leurs lieux de résidence (*NIMBY – Not In My Back Yard*) (remarque du COPIL).

⁴¹ En particulier, c'est à Taiwan que se situe TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company), la plus importante fonderie de semiconducteurs indépendante, en mesure de produire des puces électroniques de très haute technologie. Or, Taiwan est aujourd'hui fragilisé par les tensions existantes avec la Chine (remarque du COPIL).

⁴² La gravure est un procédé qui consiste à retirer les couches de substrat à l'aide d'un acide. Dans l'industrie du semi-conducteur, pour la fabrication des composants électroniques, la lithographie est le procédé le plus utilisé.

4. Fin de vie des équipements du secteur numérique

Cette partie présente, d'une part, les étapes de la récupération des métaux dans les équipements numériques en fin de vie – collecte, tri, valorisation en recyclage – en section 4.1 et, d'autre part, les freins à la valorisation en recyclage des métaux à chacune des étapes de la fin de vie des déchets d'équipements numériques en section 4.2.

Une présentation des contextes réglementaires français et européen de la fin de vie des équipements numériques est disponible en Annexe 7.2.

4.1. Fin de vie des DEEE en France

4.1.1. Collecte

4.1.1.1. Principaux canaux de collecte des DEEE en France

La collecte des DEEE ménagers et professionnels peut être réalisée à travers différents canaux (ADEME, 2021) :

- Collectivités locales (déchèteries fixes mobiles, collecte de proximité). Il s'agit du principal canal de collecte pour les DEEE ménagers (Ecologic, 2023) ;
- Distributeurs (retour magasin, reprise livraison) ;
- Acteurs de l'économie solidaire (ex. associations d'insertions) ;
- Autres canaux de collecte (entreprises, opérateurs de recyclage). Selon un expert, pour les DEEE professionnels, la collecte est généralement réalisée directement auprès des entreprises (Ecologic, 2023) ;
- Système individuel (propre au producteur) pour les DEEE professionnels uniquement.

Pour les deux principales catégories d'équipements numériques ménagers (informatiques et « image et son »), les trois exutoires les plus fréquents sont les suivants (Ecologic, 2020) :

- **Pour les équipements informatiques** (ex. écrans d'ordinateurs, ordinateurs portables, tablettes) : apport en déchèterie (38,7 %) ; don à un particulier ou une association (16,4 %) ; apport dans un magasin qui collecte ce type d'appareil (8,1 %) ;
- **Pour les équipements « Image et son »** (ex. télévisions, box, smartphones) : apport en déchèterie (33 %) ; don à un particulier ou une association (13 %) ; apport dans un magasin qui collecte ce type de d'appareil (9,8 %).

Les équipements sont ensuite récupérés par un prestataire pour le compte d'un éco-organisme – sauf dans le cas d'un système individuel – et transportés vers le lieu approprié pour être séparés et traités.

Le secteur des DEEE ménagers est géré par deux principaux éco-organismes (hors panneaux photovoltaïques⁴³) : **Ecologic** (178 948 kt de DEEE collectés pour 23 % du marché en 2020) et **ecosystem** (588 322 kt de DEEE collectés pour 77 % du marché en 2020) (Calcul Deloitte d'après ADEME, 2021).

⁴³ Soren (ex-PV Cycle) est le troisième éco-organisme et couvre 8 % des DEEE ménagers (en masse) et s'occupe principalement des panneaux photovoltaïques, qui ne sont pas inclus dans le périmètre de la présente étude (Calcul Deloitte d'après ADEME, 2021).

4.1.1.2. Typologie d'équipements collectés en France

Les éco-organismes agréés collectent les **flux de DEEE ménagers selon une typologie des huit catégories** présentée en Annexe 7.2.1.1 : CAT01 Équipements d'échange thermique ; CAT02 Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm² ; CAT03 Lampes ; CAT04 Gros équipements ; CAT 5 Petits équipements ; CAT06 Petits équipements informatiques et de télécommunications ; CAT07 Panneaux photovoltaïques ; CAT08 Cycles à pédalage assisté et engins de déplacement personnel motorisés⁴⁴.

En particulier, **les catégories de DEEE ménagers qui regroupent le plus d'équipements du périmètre de l'étude sont les catégories CAT02 et CAT06** (e-déchets, 2023) :

Tableau 18 : Tonnages d'équipements ménagers collectés en 2020 par les deux éco-organismes agréés pour les deux principales de catégories de DEEE numériques en France (Calcul Deloitte d'après ADEME, 2021)

Catégorie de DEEE	Equipements du périmètre de l'étude	Tonnage d'équipements ménagers collectés en 2020 (en tonnes, en %)	
		Ecologic	ecosystem
CAT02 Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ²	<ul style="list-style-type: none"> • Ordinateurs portables ; • Téléviseurs ; • Ecrans d'ordinateurs. 	14 534 (27 %)	39 750 (73 %)
CAT06 Petits équipements informatiques et de télécommunications	<ul style="list-style-type: none"> • Tablettes ; • Smartphones ; • Casques AR/VR ; • Box TV ; • Stations d'accueil ; • Objets connectés IoT ; • Box Internet. 	40 738 (55 %)	32 790 (45 %)

Du point de vue de la collecte, **un produit professionnel en fin de vie peut être intégré dans le flux de DEEE ménagers pour faciliter son traitement** (ex. téléphone, ordinateur d'entreprise). En effet, « les déchets provenant d'équipements électriques et électroniques qui sont susceptibles d'être utilisés à la fois par les ménages et par des utilisateurs autres que les ménages sont considérés comme étant des déchets d'équipements électriques et électroniques provenant des ménages » (Article R543-173 du Code de l'environnement).

Les quantités de produits ménagers utilisés dans un cadre professionnel et retrouvés dans le gisement des DEEE ménagers sont les suivantes (estimations – OCAD3E, 2021) : GEM F : 12 % ; GEM HF : 10 % ; PEM : 10 % ; **Écrans** : 13 % ; **PAM IT** : 41 % ; Lampes : 77 %.

Par ailleurs, il existe également une **filière REP Piles & Accumulateurs**, qui gère la collecte de certains composants des équipements numériques (ex. piles, batteries portables). En 2021, deux éco-organismes se partageaient le marché : Corepile (63,7 % en 2021) et Screlec (36,3 % en 2021) (ADEME, 2022).

⁴⁴ Ces catégories réglementaires sont elles-mêmes regroupées en flux de DEEE, qui sont des catégories opérationnelles fonction de la réalité du système de collecte français, qui fusionne ou divise certains flux en fonction des similitudes des tailles des produits ou de leur traitement. C'est le cas par exemple des CAT 05 « Petits équipements » et 06 « Petits équipements informatiques et de télécommunications », considérés dans un seul flux appelé PAM (qui peut être distingué entre PEM et PAM IT, voir la définition dans la section « Sigles et acronymes ») (OCAD3E, 2021)

4.1.1.3. Taux de collecte des DEEE par rapport aux mises sur le marché et au gisement de DEEE

- Bien que la filière agréée parvienne à collecter des volumes de plus en plus importants de DEEE...

La Figure 23 montre comment, au fil des ans, **le système de collecte a réussi à capter un volume croissant de déchets**. C'est le cas de la collecte des Petits Appareils Ménagers (PAM), qui regroupent plusieurs équipements du périmètre de l'étude (tablettes, smartphones, casques AR/VR, box TV et internet, stations d'accueil, objets connectés IoT) (ADEME, 2021).

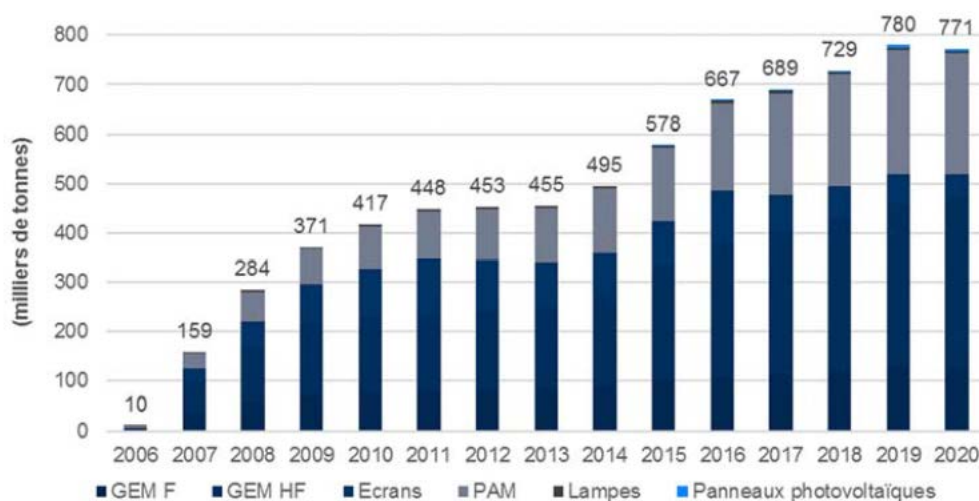


Figure 23 : Evolution des tonnages de DEEE ménagers collectés, par flux entre 2006 et 2020 en France (ADEME, 2021)

- ... plus de la moitié du gisement d'écrans et de PAM IT n'est pas collecté aujourd'hui.

Une comparaison montre également que **la différence entre la quantité de DEEE collectés et le gisement disponible est encore significative**. Les taux de collecte des DEEE, par rapport aux mises sur le marché (objectif : 65 %) et par rapport au gisement estimé (objectif : 85 %) sont présentés dans le Tableau 19. Celui-ci présente à la fois les taux de collecte pour tous les DEEE (total) ainsi que pour les catégories de DEEE qui rassemblent la majorité des équipements numériques (écrans et PAM).

L'une des raisons pour lesquelles le taux de collecte des écrans par rapport aux mises sur le marché (MSM) était nettement plus élevé que celui des PAM en 2019 – date des données de l'étude OCAD3E – est que les éco-organismes collectaient toujours des écrans à tube cathodiques ou CRT (remarque du COPIL).

Des informations plus détaillées concernant le gisement de DEEE professionnels et le gisement de DEEE ménagers spécifiques aux écrans et aux PAM sont disponibles en annexe 7.2.

Tableau 19 : Taux de collecte en France des DEEE ménagers et professionnels par rapport aux mises sur le marché et au gisement estimé en 2019 (OCAD3E, 2021c)

Catégorie de DEEE	Collecte en 2019 (kt)	Taux de collecte des DEEE	
		Par rapport aux mises sur le marché (MSM)	Par rapport au gisement estimé
TOTAL	862	46 %	48 %
<i>Focus sur les écrans</i>	<i>59</i>	<i>84 %</i>	<i>37 %</i>
<i>Focus sur les petits appareils ménagers (PAM)</i>	<i>283</i>	<i>48 %</i>	<i>51 %</i>

- **Cet écart entre gisement et collecte est notamment dû à des « fuites ».**

En agrégeant ces données et en les comparant directement avec les données de collecte des éco-organismes (Figure 24), il est possible de détecter **l'existence de certaines fuites**. Un exemple est donné par les disparités constatées entre les quantités laissées dans les déchèteries et celles effectivement récupérées au même endroit par l'éco-organisme, signe d'un vol potentiel d'appareils entiers ou de leur cannibalisation (OCAD3E, 2021).

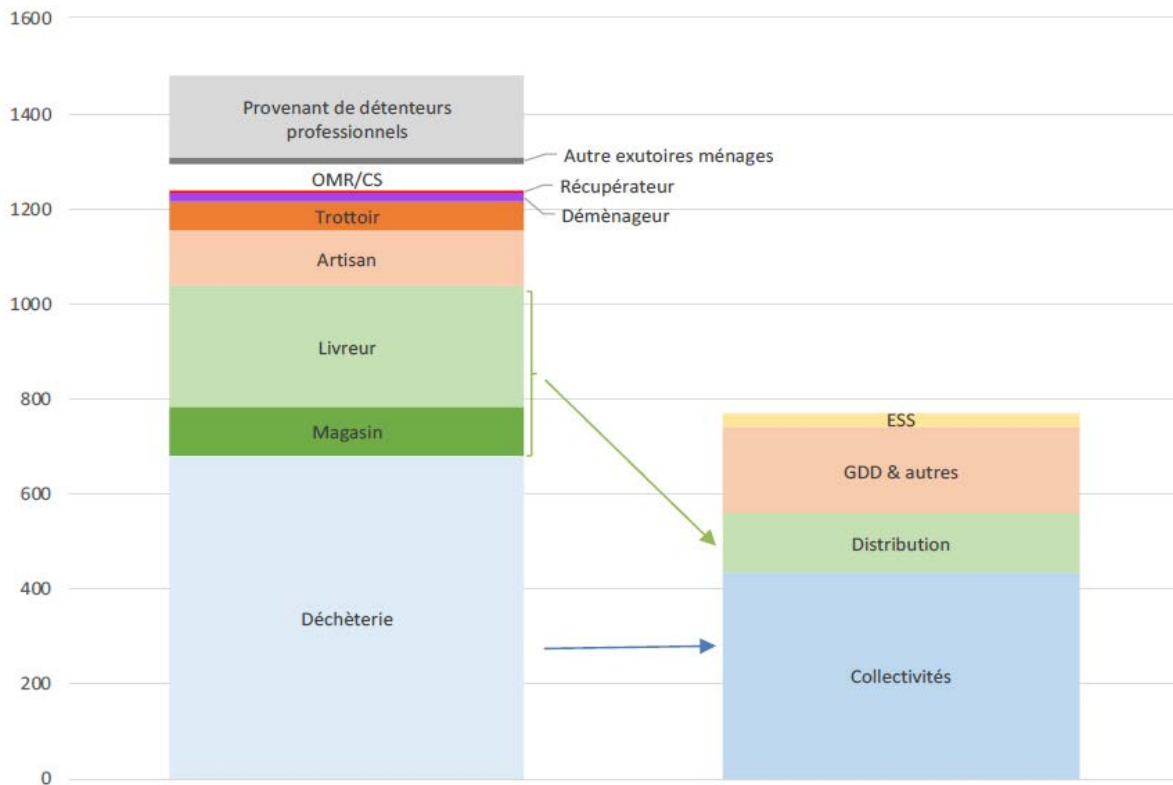


Figure 24 : Comparaison entre exutoires primaires du gisement et origines de la collecte (GEM+PAM+écrans) (kt) en France (OCAD3E, 2021)⁴⁵

4.1.2.Tri

Une fois l'équipement collecté, son parcours au cours du tri peut se poursuivre de différentes manières, en fonction de l'état du produit lui-même :

- Réemploi ou réutilisation – cf. section 4.1.2.1 ;
- Recyclage – cf. section 4.1.2.2.

4.1.2.1. Réemploi ou réutilisation

L'article L541-1-1 du Code de l'environnement indique les définitions suivantes :

- **Réemploi** : « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus » ;
- **Réutilisation** : « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau ».

Les quantités réemployées et réutilisées par filière et pour deux catégories de DEEE – qui regroupent le plus d'équipements du périmètre de l'étude – sont présentées dans le tableau ci-dessous (ADEME, 2021b).

⁴⁵ GDD : gestionnaire de déchets ; CS : Collecte sélective ; OMR : Ordures ménagères résiduelles.

Tableau 20 : Quantités réemployées et réutilisées par filière et par catégorie en France (d'après ADEME, 2021b)

Catégorie	DEEE/EEE ménagers préparés à la réutilisation et au réemploi (tonnes)	DEEE/EEE professionnels préparés à la réutilisation et au réemploi (tonnes)
CAT02 : Ecrans, moniteurs avec écran d'une surface supérieure à 100 cm ²	1 271	2
CAT06 : Petits équipements informatiques et de télécommunications	1 032	889

Ces flux sont principalement gérés par des **acteurs de l'Economie Sociale et Solidaire (ESS)** tels que le Réseau Envie, le Mouvement France, les Ateliers du Bocage ou le réseau des Ressourceries. Ces entités disposent de plusieurs points de réparation et de vente à travers la France et de structures opérationnelles qui varient d'un cas à l'autre. Pour la collecte des équipements, elles ont recours à des partenariats avec Ecologic ou ecosystem (OCAD3E, 2021).

Outre les acteurs de l'ESS, **d'autres entreprises sont actives sur le marché** du réemploi et de la réutilisation (OCAD3E, 2021) :

- **Entreprises positionnées sur la réparation** ayant créé une offre de produits reconditionnés (ex. Murfy, Spareka) ;
- **Marques de distributeurs** (ex. Boulanger 2nd life, Darty, etc.) ;
- Pour les produits professionnels, environ 80 % acteurs sont indépendants, regroupés dans le principal syndicat, le **SIRMIET** (Syndicat Interprofessionnel du Reconditionnement et de la Régénération des Matériels Informatiques, Electroniques et Télécoms). D'autres acteurs importants du secteur de l'ESS professionnelle sont ATF Gaïa et les Ateliers du Bocage.

Focus sur les tendances d'achat des produits usagés

Le marché des produits réutilisés est principalement alimenté par une dynamique de prix compétitive par rapport aux nouveaux modèles. Selon le Baromètre publié annuellement par Kantar, en 2023 l'inflation jouera un rôle décisif dans les tendances d'achat des Français, dont 66 % se déclarent intéressés par l'achat d'un appareil électronique reconditionné.

Particulièrement dans le cas des smartphones, les données montrent une **part importante des consommateurs ayant déjà acheté un téléphone reconditionné** (45 %), soit près d'un Français sur deux. Ce phénomène s'accompagne d'une meilleure disponibilité du gisement stocké auparavant dans les maisons des Français, 30 % de la population ayant déjà vendu son ancien smartphone (Recommerce, 2023). En revanche, pour d'autres produits comme les téléviseurs, 90 % des consommateurs achètent encore du neuf (Arcep, 2022).

4.1.2.2. Recyclage des DEEE

L'article L541-1-1 du Code de l'environnement indique la définition suivante de **recyclage** : « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets [...] ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage ».

4.1.2.2.1. Etapes de traitement des DEEE

Les différentes étapes de traitement des DEEE en centre de traitement sont les suivantes (ADEME, 2021) :

1. Le démantèlement à la main : **séparation de différents composants** (condensateurs au PCB et électrolytiques, cartes électroniques, dites « riches » « moyennes » ou « pauvres »⁴⁶, câbles, moteurs, composants complexes comme les disques durs, batteries⁴⁷, etc.) et **dépollution**. L'étape de démantèlement et de dépollution est coûteuse et est couverte par les écocontributions (Ecologic, 2023) ;
2. Le broyage des équipements en morceaux de faible taille ;
3. Une séparation électromagnétique des éléments ferreux à l'aide d'aimants ;
4. Un tri optique qui permet de séparer les cartes électroniques, qui sont valorisées ultérieurement via un autre procédé de recyclage pour récupérer certains métaux du périmètre de l'étude contenus dans ces fractions ;
5. Une séparation des éléments métalliques non ferreux (dont le cuivre et l'aluminium) grâce à des machines à courants de Foucault ;
6. Une séparation des plastiques par flottaison ou tri optique – Les autres résidus tels que le papier tombent au fond du bac alors que le plastique reste en surface.

La responsabilité vis-à-vis des DEEE change au cours des étapes de traitement des DEEE :

1. **Les éco-organismes sont responsables des DEEE de la collecte jusqu'au démantèlement** réalisé par leurs prestataires. Les éco-organismes financent les opérateurs du démantèlement sur la base des matières premières de recyclage qu'ils sont en mesure de produire et de vendre, en les indexant sur les cours des matières premières (Ecologic, 2023 et ecosystem, 2023) ;
2. C'est ensuite à l'entreprise en charge du broyage, avec qui les éco-organismes sont en contrat, de vendre les broyats à différents types de clients tels que les aciéries, les entreprises de pyrométallurgie et les spécialistes de la décomposition des alliages d'aluminium, etc. (Ecologic, 2023 et ecosystem, 2023). Il peut y avoir jusqu'à sept niveaux de traitement (en moyenne quatre) avant d'atteindre l'étape de la récupération du métal. Les sites de traitement sélectionnent leurs filières aval et les déclarent ensuite aux éco-organismes. **A ce stade, les fractions ne sont plus la propriété des éco-organismes**, hormis les substances dangereuses, qu'ils reprennent directement (ecosystem, 2023).

La plupart des fractions récupérées sont issues de DEEE ménagers (92 %) (ADEME, 2021). 12 % de ces DEEE proviennent de détenteurs professionnels (dont 41 % de PAM IT). Comme mentionné précédemment, ils sont néanmoins intégrés dans les flux ménagers en raison de la réglementation (OCAD3E, 2021).

Le Tableau 21 présente une liste non exhaustive des différents opérateurs qui traitent les DEEE et les fractions issues de ce traitement (ADEME, 2019).

Tableau 21: Liste des sites de traitement des fractions DEEE en France (ADEME, 2019)

Informations générales		Fractions de DEEE traitées			
Installation	Localité Installation	Cartes électroniques	Plastiques en mélange	Tubes cathodiques	Résidus de broyage (métaux mixtes)
ALSAREC	ROSENAU	X			
ATELIERS FOUESNANTAIS	FOUESNANT			X	
BAUDELET METAUX	BLARINGHEM				X
Chimie Francet	DREUX	X			
ENVIE 2E MIDI-PYRENEES SAS	PORTET SUR GARONNE		X		

⁴⁶ Les récupérateurs de métaux distinguent des composants « high-grade » (« riches », souvent des cartes logiques des équipements IT) et des « low-grade » (« pauvres », souvent des cartes de puissance). La dénomination « riche » ou « pauvre » est définie en fonction de la quantité de métaux précieux – Au, Cu, Pd - qu'elles contiennent : « riches » si la teneur supérieure à 120 ppm d'or, « pauvres » si elle avoisine 20 ppm) (WEEE Cycling, 2023 et Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

⁴⁷ Les batteries sont envoyées à un éco-organisme (Corepile ou Screlec) (Ecologic, 2023).

Informations générales		Fractions de DEEE traitées			
Installation	Localité Installation	Cartes électroniques	Plastiques en mélange	Tubes cathodiques	Résidus de broyage (métaux mixtes)
ENVIRONNEMENT RECYCLING	DOMERAT			X	
GALLOO FRANCE	HALLUIN		X		X
MORPHOSIS	LE HAVRE	X			
MSP	CARBONNE	X			
NORVAL	BERVILLE-SUR-SEINE		X		X
PRAXY CENTRE	ISSOIRE CEDEX				X
PROMOTRAME	LONGROY	X			
REFINAL INDUSTRIES	BRUYERES SUR OISE				X
REFINAL INDUSTRIES	PAGNY SUR MEUSE		X		X
REGAIN ECO-PLAST	FOURCHAMBAULT			X	
REVIVAL (DERICHEBOURG)	ROCQUANCOURT				X
SIRMET	BOULAZAC		X		
TRIADE ELECTRONIQUE	VERRIER S EN ANJOU		X		
VALRECY - COULOMBIERS	COULOMBIERS				X
IGNEO FRANCE	ISBERGUES	X			

La base de données SINOE® déchets permet d'obtenir des données plus exhaustives sur les opérateurs de tri des DEEE traitant les petits équipements électroménagers et écrans – cf. Tableau 22.

Tableau 22 : Nombre de sites de traitement en France de DEEE par type d'activité et déchets traités – données SINOE® 2024

	Petit électroménager hors d'usage	Ecrans, dont appareils à tubes cathodiques
Broyage préalable à une valorisation matière	38	1
Démontage, démantèlement	81	83
Prétraitement préalable à une valorisation matière	1	
Tri, regroupement ou démontage		1

4.1.2.2.2. Types de fractions recyclées, valorisées et éliminées

- **La filière de recyclage de DEEE extrait de nombreuses fractions métalliques et non métalliques des équipements en fin de vie.**

Comme le montre un échantillonnage réalisé par les éco-organismes en 2019 (Tableau 23), plus de la moitié du poids récupéré à partir des DEEE collectés est composé de métaux ferreux (50,6 %) et non ferreux (7,3 %) (ADEME, 2020a) :

Tableau 23 : Composition des DEEE ménagers en France, tous DEEE confondus (campagne de caractérisation des éco-organismes, données 2019) (ADEME, 2021)

Type de composants	Quantités (en tonnes)	% du total des DEEE traités
Cartes de circuits imprimés	10 455	1,4 %
Fraction minérale	38 726	5,0 %
Résidus de broyage	84 361	11,0 %
Métaux ferreux	389 561	50,6 %
Métaux non-ferreux	55 891	7,3 %
Matières plastiques	144 443	18,8 %
Verre	31 868	4,1 %
Autres	14 159	1,8 %
TOTAL	769 463	100 %

Par exemple, il existe plusieurs façons de séparer les cartes électroniques :

- **Démantèlement manuel.** Cette pratique est notamment utilisée dans la préparation des matières par des acteurs de l'économie sociale et solidaire (ex. Réseau Envie, Emmaüs) ;
- **Passage dans un broyeur, puis tri optique ou séparation manuelle.** Cette méthode est utilisée par les principaux acteurs du tri des DEEE. Vient ensuite l'étape de concentration des cartes électroniques (y compris celles présentes dans les fines), puis leur vente aux acteurs de la récupération des métaux dans les cartes électroniques (Terra Nova Développement, 2024).

- Ces fractions peuvent être recyclées, valorisées ou éliminées.

A partir de l'analyse de la composition de cinq types d'équipements numériques (ordinateurs portables, smartphones, box internet et TV, consoles de jeux vidéo, moniteurs), on estime que **les principales fractions extraites par les filières de traitement** des équipements numériques en fin de vie sont celles présentées dans le Tableau 24. Ces fractions peuvent être :

- **Recyclées**, c'est-à-dire réincorporées dans un nouveau cycle de production, pas nécessairement pour le même que celui de l'équipement dont est issue la matière) ;
- **Valorisées⁴⁸ autrement.** Par exemple, dans le cadre de la valorisation énergétique, l'énergie produite lors du traitement des DEEE peut être récupérée sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburant. Le principal mode de production énergétique est l'incinération ;
- **Éliminées** : autres opérations (ex. enfouissement).

Dans le Tableau 24, pour chaque fraction de chaque type de DEEE (PAM ou écrans plats), « ++ » signifie que plus de 50 % de ces fractions se dirige vers un mode de traitement, « + » entre 10 % et 50 % et « - » moins de 10 % des fractions. Par exemple, pour les cartes électroniques des PAM, une part importante sont soit recyclées, soit éliminées (entre 10 % et 50 %). Très peu de cartes électroniques sont valorisées autrement (moins de 10 %).

Tableau 24 : Principales fractions extraites des équipements numériques (PAM et écrans plats) et leurs destinations (Deloitte, d'après données d'expert)

Fractions de DEEE	Exemples d'équipements contenant ces fractions	PAM			Ecrans plats		
		Recyc-lage	Autres valori-sations	Elimi-nation	Recyc-lage	Autres valori-sations	Elimi-nation
Câbles	Tous équipements	+	+	+	+	+	+

⁴⁸ On entend par valorisation « toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie ». Il existe treize types d'opérations de valorisation, dont le recyclage ou récupération des métaux et des composés métalliques ou l'utilisation principale comme combustible (cf. Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19/11/2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives).

Fractions de DEEE	Exemples d'équipements contenant ces fractions	PAM			Ecrans plats		
		Recyc-lage	Autres valori-sations	Elimi-nation	Recyc-lage	Autres valori-sations	Elimi-nation
Cartes électroniques	Tous équipements	+	-	+	++	-	+
Condensateurs	Ordinateurs portables, box, moniteurs	-	++	+	-	++	+
Déchets banals	Tous équipements	-	++	+	+	+	+
Dalles LCD		N/A	N/A	N/A	-	++	+
Dalles plasma	Ordinateurs portables, smartphones, box, moniteurs	N/A	N/A	N/A	+	+	+
Lampes	Ordinateurs portables, moniteurs	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Lecteur et disques	Ordinateurs portables, box, consoles de jeux vidéo, moniteurs	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Métaux ferreux	Tous équipements	++	-	-	++	-	-
Métaux non ferreux	Tous équipements	++	-	-	++	-	-
Piles et accumulateurs	Ordinateurs portables, smartphones, consoles de jeux vidéo, moniteurs	++	+	-	++	+	-
Plastiques	Tous équipements	++	-	+	++	-	+
Verre	Smartphones	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Aimants	Smartphones, consoles de jeux vidéo	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Moteurs / induits	Box, consoles de jeux vidéo	++	-	-	++	-	-
Autres composants	Tous équipements	+	+	+	+	++	-

4.1.3. Valorisation en recyclage

4.1.3.1. Types de destinations des équipements numériques en fin de vie

- Le recyclage est, par une marge considérable, le principal type de traitement des DEEE numériques.

En 2020, 756 604 tonnes de DEEE ménagers et 78 047 tonnes de DEEE professionnels ont été traitées. 97 % des traitements ont été réalisés en France sur 767 sites, le reste étant exporté pour traitement vers les pays européens voisins de la France (ADEME, 2021). Les types de traitement se répartissent selon les différentes catégories présentées dans le Tableau 25 ci-dessous.

Tableau 25 : Répartition des tonnages d'équipements ménagers traités en 2019 par type de traitement et par catégorie en France (ADEME, 2020a)

FLUX	Type de traitement (tonnes et %)					
	Elimination	Préparation à la réutilisation	Recyclage matière	Réutilisation de pièces	Valorisation énergétique	Total général
<i>Principales catégories de DEEE ménagers pour le secteur du numérique</i>						
PAM	38 474 (16 %)	3 009 (1 %)	170 029 (72 %)	37 (0 %)	25 433 (11 %)	236 983
Ecrans	19 026 (38 %)	1 075 (2 %)	25 044 (50 %)	25 (0 %)	4 909 (10 %)	50 080
<i>Autres catégories de DEEE ménagers</i>						
GEM froid	8 461 (7 %)	1 069 (1 %)	95 704 (78 %)	942 (1 %)	16 334 (13 %)	122 510
GEM hors froid	37 413 (11 %)	2 037 (1 %)	268 472 (79 %)	2 455 (1 %)	28 464 (8 %)	338 841
Lampes	376 (8 %)	-	3 954 (85 %)	-	295 (6 %)	4 625
Panneaux photovoltaïques	268 (17 %)	-	1 197 (76 %)	-	100 (6 %)	1 565
Total général	104 018 (14 %)	7 191 (1 %)	564 401 (75 %)	3 460 (0 %)	75 536 (10 %)	754 604

- **Les données sur le recyclage par métal et par équipement numérique sont incomplètes.**

Si le recyclage apparaît comme le mode de traitement principal des DEEE, **les données sur le recyclage des métaux pris individuellement sont lacunaires**. En général, les taux de recyclage des PAM (PEM + PAM IT) et des écrans est plus faible que celui des équipements de GEM (froid et hors froid), principalement en raison de leur plus grande proportion de plastique, ainsi que de la présence de certains polluants tels que les retardateurs de flamme bromés, qui ne peuvent pas être recyclés (ecosystem, 2023).

Pour le secteur du numérique, les principales données accessibles à date sont les **taux de recyclage par fraction, uniquement l'échelle des types d'équipements** (PAM et Ecrans plats) :

A noter : Certaines fractions/matières représentant de très faibles parts (parfois inférieures à 1 %), les données concernant leur fin de vie peuvent manquer de fiabilité.

- Les résultats des campagnes de caractérisation des éco-organismes par l'ADEME (données 2019) pour le gisement des **petits appareils en mélange** (PAM), présentés dans le Tableau 26 :

Tableau 26 : Répartition des différents matériaux/composants pour les Petits Appareils en Mélange (PAM) et taux de recyclage et de valorisation associés en 2019 (d'après ADEME, 2020b)

Matières / Fractions	Part dans la composition (% de la masse totale)	Taux de recyclage	Taux de valorisation (taux de recyclage + taux d'autres valorisations)
Câbles électriques extérieurs	4,23 %	44 %	69 %
Cartes de circuits imprimés	2,74 %	57 %	86 %
Cartouches toners	0,15 %	50 %	89 %
Composants contenant du mercure (lampe au mercure)	0,01 %	50 %	51 %
Condensateurs contenant potentiellement des PCB ou autres substances dangereuses	0,18 %	0 %	11 %
Déchets banals	5,00 %	3 %	12 %
Déchets d'amiante et composants contenant de l'amiante	0,04 %	0 %	0 %
Écrans plats	0,04 %	48 %	61 %
Résidus de broyage	6,09 %	7 %	36 %
Huiles susceptibles de contenir des PCB	0,08 %	7 %	7 %
Métaux ferreux	35,71 %	99 %	99 %
Métaux non ferreux	8,52 %	93 %	96 %
Piles et accumulateurs	0,82 %	62 %	63 %
Plastiques ne contenant pas de RFB	17,32 %	93 %	96 %
Plastiques susceptibles de contenir des RFB (retardateurs de flammes bromées)	7,91 %	0 %	30 %
Transformateurs ou autres induits moteurs	9,46 %	92 %	93 %
Verre	0,10 %	64 %	64 %
Autres	1,59 %	39 %	50 %
TOTAL flux	100 %	73 %	81 %

- Les résultats des campagnes de caractérisation des éco-organismes par l'ADEME (données 2019) pour le gisement des **écrans plats**, présentés dans le Tableau 27 :

Tableau 27 : Répartition des différents matériaux/composants pour les écrans plats et taux de recyclage et de valorisation associés en 2019 (d'après ADEME, 2020b)

Matières / Fractions	Part dans la composition (% de la masse totale)	Taux de recyclage	Taux de valorisation (taux de recyclage + taux d'autres valorisations)
Câbles électriques extérieurs	0,71 %	29 %	44 %
Cartes de circuits imprimés	5,19 %	67 %	90 %
Composants contenant du mercure (lampe au mercure)	2,14 %	12 %	53 %
Condensateurs contenant potentiellement des PCB ou autres substances dangereuses	0,15 %	0 %	8 %
Déchets banals	2,89 %	7 %	44 %
Dalles plasma	0,74 %	0 %	1 %

Matières / Fractions	Part dans la composition (% de la masse totale)	Taux de recyclage	Taux de valorisation (taux de recyclage + taux d'autres valorisations)
Dalles d'écrans LCD	5,82 %	0 %	27 %
Résidus de broyage	9,27 %	13 %	63 %
Métaux ferreux	39,46 %	99 %	100 %
Métaux non-ferreux	5,15 %	63 %	100 %
Piles et accumulateurs	0,08 %	51 %	58 %
Plastiques ne contenant pas de RFB	19,88 %	90 %	90 %
Plastiques susceptibles de contenir des RFB (retardateurs de flammes bromées)	7,69 %	5 %	78 %
Transformateurs ou autres induits moteurs	0,01 %	85 %	86 %
Autres	0,80 %	1 %	21 %
TOTAL flux	100 %	66 %	83 %

4.1.3.2. Récupération des métaux du périmètre de l'étude dans les composants des DEEE collectés

4.1.3.2.1. Récupération des métaux issus de tous les secteurs économiques

Les études du Joint Research Centre européen en 2018 et 2023 présentent les taux de recyclage en fin de vie de métaux au sein de l'Union européenne (**EOL-RR** : End of Life Recycling Rate)⁴⁹ et de la quantité de ceux qui sont ensuite réutilisés pour répondre à la demande de matériaux (**EoL-RIR** : End of Life recycling input rate)⁵⁰, indépendamment de leur application d'origine ou de leur application une fois recyclés. Ainsi, certains métaux recyclés et comptabilisés dans l'EoL-RIR peuvent intégrer des matières premières de recyclage issues d'autres secteurs que le numérique (ex. énergie, transports).

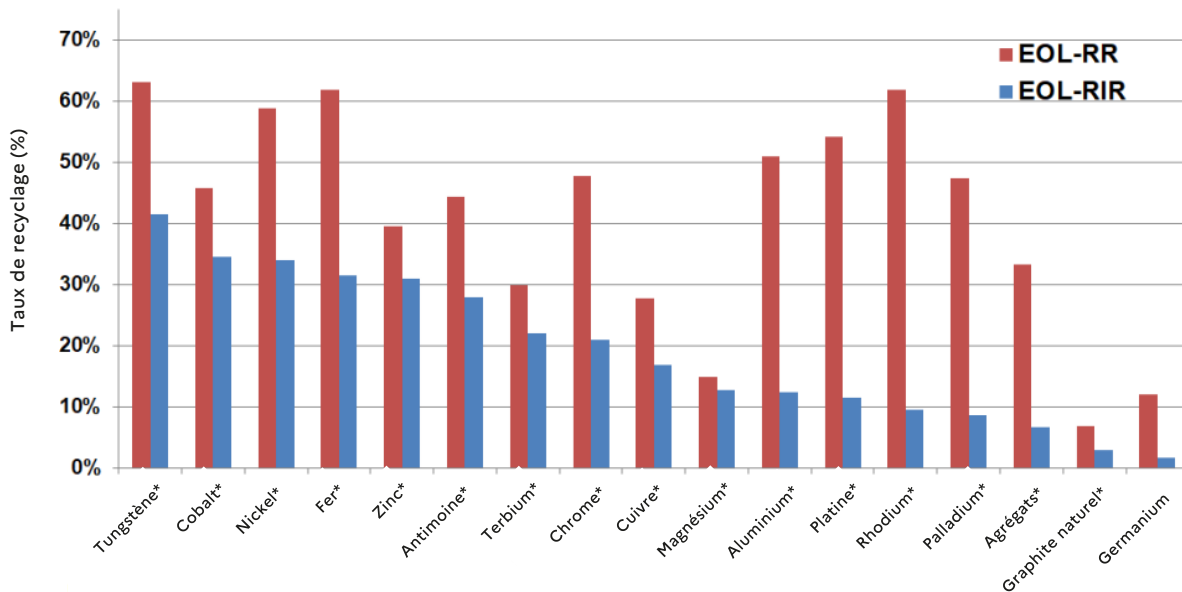
Indépendamment du secteur d'utilisation, la Figure 25 montre que :

- **La chaîne de recyclage – mesurée par l'indicateur EoL-RR – est déjà très mature** pour certains métaux de base (aluminium, fer), les métaux de batterie (nickel, cobalt) et les métaux précieux (platine, rhodium, palladium) ;
- **Ces trois familles de métaux n'incorporent pas autant de matière recyclée.** La contribution de matériaux recyclés à la demande de matières premières – mesurée par l'indicateur EoL-RIR – est nettement plus élevée pour les métaux de base et les métaux batterie que pour les métaux précieux.

La faiblesse relative du taux d'incorporation – **EoL-RIR** – peut être due à des exigences techniques particulières d'alliages ne permettant pas l'incorporation de métaux recyclés, ou d'une consommation supérieure à l'offre de métal recyclé. En particulier, **pour les métaux dont le secteur numérique représente une part significative des utilisations**, par exemple Ga, Ge ou certaines terres rares (Malmodin et al., 2018), **le taux d'incorporation est bas** – cf. figure ci-dessous.

⁴⁹ EOL – RR = Production secondaire (à partir de déchets post-consommation) / (Matériaux en fin de vie + Importations de produits en fin de vie).

⁵⁰ EOL – RIR = Production de matières premières de recyclage (uniquement issus des déchets post-consommation) / (Production de matières premières vierges + Production de matières premières de recyclage (à partir de déchets pré- et post-consommation)).



Couverture géographique : monde. Les estimations de recyclage sont basées sur :
 *Études d'analyse des systèmes de matériaux de la CE. Couverture géographique : UE-28
 **Évaluation des matières premières critiques de la CE 2017 (EOL-RIR) et UNEP/IRP (2011) (EOL-RR).

Figure 25 : EOL-RR en comparaison avec EOL-RIR pour des matériaux sélectionnés dans l'UE (JRC, 2018)

Dans certains cas, comme celui des terres rares, **la chaîne de recyclage n'est pas encore suffisamment mature**, étant donné qu'il n'y a pas de chaînes aval capables de réincorporer ces métaux à l'échelle industrielle en Europe dans d'autres EEE. La Figure 26 indique, par exemple, que le recyclage des terres rares au sein de l'Union européenne satisfait seulement 6 à 7 % de la demande en terres rares de l'UE.

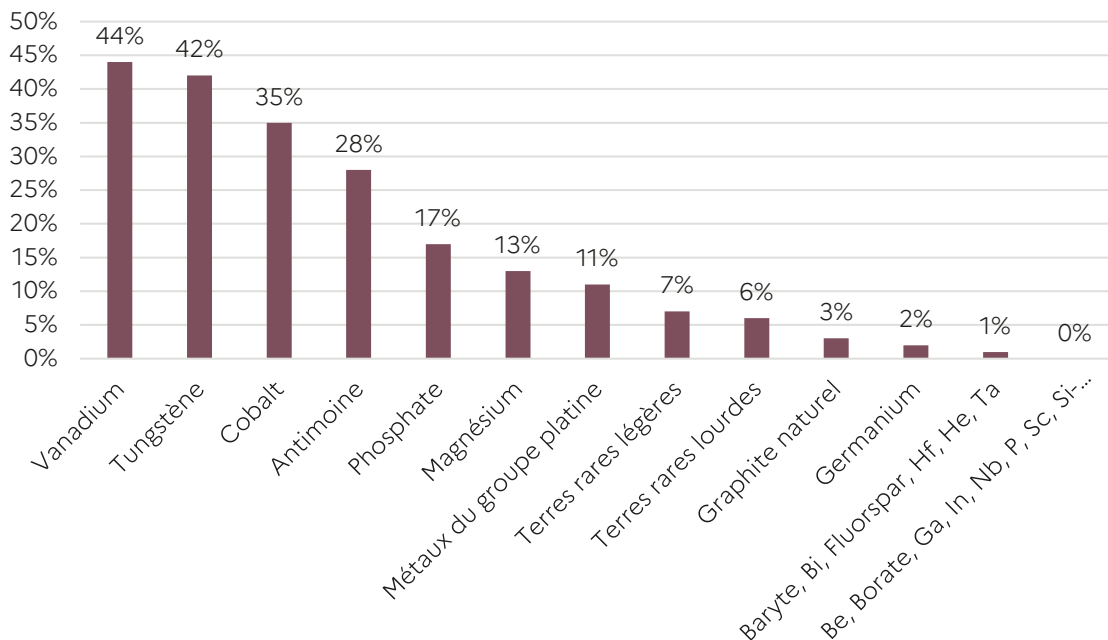


Figure 26 : Contribution du recyclage à la satisfaction de la demande de l'UE en matières premières : EOL RIR. (JRC, 2023)

4.1.3.2.2. Récupération des métaux dans les composants des DEEE

Les principaux métaux récupérés dans les DEEE du secteur du numérique, en tant que tels ou sous forme d'alliages, sont l'acier, l'aluminium, le cuivre, le laiton et le nickel (sur certains sites) et les métaux précieux (ex. or, argent, platinoïdes) (ecosystem, 2023).

De nombreux projets de recyclage de métaux issus de DEEE se concentrent sur une seule phase de la récupération ; il est également possible d'adopter une approche holistique de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement (WEEE Cycling, 2023), tenant compte de toutes les étapes de la récupération des métaux.

Cette section prend l'**exemple de la récupération des métaux des cartes électroniques**, pour plusieurs raisons :

- Elles représentent une part importante de la masse des équipements du secteur du numérique, allant jusqu'à un tiers de la masse de certains petits équipements IT (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques) ;
- Il s'agit du composant qui concentre le plus de métaux de l'étude, notamment les suivants : cuivre, or, argent, platine, palladium, zinc, nickel, étain, manganèse. Sa teneur en métaux varie de 20 à 40 % en poids et s'élève en moyenne à 30 %⁵¹ (Bizzo et al., 2014) ;
- Des filières de récupération des métaux dans les cartes électroniques usagées se sont développées à des échelles nationale, européenne et mondiale. Ainsi, les cartes électroniques sont le composant dont les taux de recyclage sont les plus élevés, puisqu'elles contiennent des métaux précieux, et que les procédés d'extraction pour les extraire existent pour certains de ces métaux (Terra Nova Développement, 2024).

Les cartes électroniques ne sont toutefois pas les seuls composants riches en métaux. Par exemple, un focus sur la chaîne de valeur du recyclage des piles et accumulateurs est également réalisé en 7.4.

- **Les « récupérateurs de métaux » collectent des composants issus de DEEE, qu'ils analysent selon leurs teneurs en or, argent et cuivre.**

En général, les « récupérateurs de métaux » (ex. Aurubis, Boliden et Umicore pour les cartes électroniques) n'achètent pas d'équipements mais des composants issus de DEEE déjà collectés, démantelés et broyés. En tant que de besoin, certains récupérateurs pratiquent parfois le broyage des DEEE et peuvent même traiter des téléphones sans batteries⁵² (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

La capacité d'analyse des lots est généralement à la main des acteurs de la récupération des métaux et non des acteurs du tri des DEEE en France qui ne sont pas en mesure de le faire (Terra Nova Développement, 2024). Les récupérateurs de métaux distinguent des **cartes « riches »**⁵³ et des **cartes « pauvres »**. L'estimation de la valeur des cartes électroniques est l'un des principaux enjeux économiques de la filière de fin de vie des DEEE.

En général, **les proportions de métaux récupérés dans les DEEE dépendent du chiffre d'affaires réalisable pour chaque métal**, en fonction du produit dans lequel il se trouve et des traitements à apporter (ecosystem, 2023). A ce titre, les cartes électroniques des équipements numériques qui sont achetées par les « récupérateurs de métaux » sont majoritairement des cartes « riches » (WEEE Cycling, 2023).

⁵¹ Les métaux prédominants sont le cuivre, l'aluminium, le fer, l'étain et le plomb (Bizzo et al., 2014).

⁵² Selon les « récupérateurs de métaux » (raffineries de métaux précieux), les batteries peuvent créer des réactions inattendues pendant le processus de récupération. Ces acteurs demandent à leurs fournisseurs retirer ces batteries avant achat (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

⁵³ Les récupérateurs de métaux distinguent des composants « *high-grade* » (« riches », souvent des cartes logiques des équipements IT) et des « *low-grade* » (« pauvres », souvent des cartes de puissance). La dénomination « riche » ou « pauvre » est définie en fonction de la quantité de métaux précieux – Au, Cu, Pd - qu'elles contiennent : « riches » si la teneur supérieure à 120 ppm d'or, « pauvres » si elle avoisine 20 ppm) (WEEE Cycling, 2023 et Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

En pratique, les composants sont analysés avant de passer dans les différentes étapes de récupération. Les teneurs en métaux sont mesurées en parties par million (ppm) afin d'estimer leur valeur (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023). Pour les cartes électroniques, l'or, l'argent et le cuivre représentent la majorité de la valeur des métaux récupérés ; leur présence en grande quantité est donc nécessaire pour qu'un récupérateur de métaux prenne une décision d'achat⁵⁴ (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

Si certains métaux précieux sont récupérés à des degrés de pureté très élevés, d'autres métaux sont extraits par les récupérateurs de métaux sous la forme de produits intermédiaires (ex. indium) ou d'alliages (ex. plomb-bismuth). Ces produits intermédiaires ne sont pas récupérés dans une forme « pure » et doivent donc être vendus à des **producteurs spécialisés dans le raffinage de ces métaux** (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023), qui disposent des technologies permettant de récupérer ces métaux à des degrés de pureté très élevés.

Focus sur le lien entre récupération des métaux et récupération du cuivre

Les cartes électroniques contiennent une grande variété de métaux : aluminium, fer, cuivre, acier inox (dans les éléments de connexion) palladium et tantale (dans les condensateurs), or (dans les microprocesseurs et dans les dépôts de surface des connexions), nickel (dans les résistances), etc.

Une grande partie de la récupération des métaux des cartes électroniques est liée à la **récupération du cuivre**, dont la filière est déjà développée à l'échelle industrielle. En effet, le cuivre étant un composant dominant des équipements électroniques, les sous-produits issus du broyage sont normalement acheminés vers l'une des grandes fonderies mondiales (dont trois en Europe : Aurubis, Boliden et Umicore). Le processus permet de récupérer des métaux précieux, même s'ils sont mélangés dans un certain alliage avec le cuivre et donc difficiles à extraire. Les métaux tels que l'étain ou le tantale ne sont généralement pas récupérés (Thomas, 2016 ; Thomas, 2020).

- **Il existe trois types de procédés de traitement des composants jusqu'à la récupération des métaux.**

Aujourd'hui, les métaux sont récupérés à partir des fractions obtenues lors de la phase de broyage au moyen de plusieurs technologies⁵⁵ :

- **Traitements thermiques (pyrolyse et pyrométallurgie)** (Thomas, 2020) :
 - La **pyrolyse** consiste à « détruire les plastiques et les résines par évaporation et cracking thermique des vapeurs produites. L'avantage est d'obtenir une matière brute polymétallique beaucoup plus facile à traiter dans les fonderies de cuivre, et ce sans perte de métaux ni production de déchets ultimes »,
 - La **pyrométallurgie**, qui comporte deux étapes principales dans le cas du cuivre :
 1. « Une fusion à une température de l'ordre de 1 100°C, qui produit des gaz, une scorie et un cuivre impur (elle peut être éventuellement suivie d'une étape d'oxydation à chaud permettant d'améliorer la pureté du cuivre) »,
 2. « Un raffinage par électrolyse qui permet de produire, d'un côté, des cathodes de cuivre pur et, de l'autre, des boues contenant les métaux précieux »,
- **Hydrométallurgie** : Dans ce processus, des acides sont utilisés pour lixivier les métaux constitutifs des déchets initiaux et les rendre solubles. Il présente un taux de récupération élevé pour tous les métaux, bien qu'il soit plus coûteux que la pyrométallurgie ;

⁵⁴ Cette étape est d'autant plus importante que les analyses des échantillons donnent des résultats différents d'un lot à un autre : entre 200 g et 300 g d'or par tonne de cartes électroniques, entre 10 % et 20 % de cuivre, etc. (Terra Nova Développement, 2024).

⁵⁵ A noter que pour chaque métal à récupérer, trois conditions sont requises : il est nécessaire d'inventer d'un procédé d'extraction, puis que l'extraction de ce métal soit rentable économiquement, puis que ce métal soit accessible en quantités suffisantes (Terra Nova Développement, 2024).

- **Electro-métallurgie** : L'électrométallurgie est une méthode métallurgique qui utilise l'énergie électrique pour produire des métaux par électrolyse. Elle constitue généralement la dernière étape de la production de métaux et est donc précédée d'opérations pyrométallurgiques ou hydrométallurgiques (Thomas, 2020).

Pour les composants issus des équipements numériques, **les principales méthodes utilisées sont l'hydrométallurgie⁵⁶ et la pyrométallurgie** (ecosystem, 2023). Selon un expert de la récupération des métaux, les avancées dans les technologies de recyclage et de raffinage ont atteint un niveau où la performance est presque maximale. Les efforts de recherche sont principalement axés sur la réduction des émissions de CO₂ générées lors des processus de raffinage (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

- **Exemple de diagramme de flux pour la récupération des métaux issus des cartes électroniques**

Focus sur la récupération des métaux issus des cartes électroniques par Umicore

Le procédé de récupération des métaux d'Umicore est unique dans le sens que l'entreprise utilise trois métaux collecteurs pendant leur processus principalement pyrométallurgique.

En particulier, les principales étapes de récupération des métaux précieux sont la fonderie (*smelting*), la lixiviation et l'électroextraction du cuivre (*leaching and electrowinning plant*), ainsi que la raffinerie de métaux précieux (*precious metals refinery*). Les opérations sont conçues pour que les matières premières puissent entrer dans le schéma de traitement à l'étape la plus optimale, déterminée par leur aspect physique et leur valeur (en métaux précieux) :

1. Le **four de fusion** ou *smelter* (première étape des opérations sur les métaux précieux) utilise le procédé Isasmelt. Cela implique l'injection d'air enrichi en oxygène et de combustible dans un bain en fusion. Le four de fusion sépare la plupart des métaux précieux dans des lingots de cuivre, des autres métaux, principalement concentrés dans une scorie de plomb, traitée ultérieurement aux opérations sur les métaux de base ;
2. Après la **lixiviation du cuivre** dans l'usine de lixiviation et d'électroextraction (*leaching and electrowinning plant*), les métaux précieux sont collectés dans un résidu qui est ensuite affiné à la raffinerie des métaux précieux ;
3. La **raffinerie des métaux précieux** (*precious metals refinery*) combine des méthodes classiques (coupellation) avec des processus uniques développés en interne (raffinerie d'argent), permettant au site d'Hoboken de traiter toutes les variations et proportions possibles de métaux précieux (argent et or) et de platinoïdes (platine, palladium, rhodium, iridium et ruthénium) (Umicore, 2010).

A noter :

- Les composants achetés par les « récupérateurs de métaux » passent généralement par une filière **« raffinerie de métaux précieux »** si leur teneur en cuivre est élevée (ex. cartes électroniques). Par ailleurs, les entreprises du recyclage (notamment asiatiques) sont d'abord spécialisées dans le recyclage du cuivre en grande masse (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023) ;
- D'autres éléments (ex. concentrats, sous-produits industriels) sont récupérés lors d'**« opérations pour les métaux de base »** et passent donc par un haut-fourneau (*blast furnace*) en premier, lorsque leur teneur en plomb est élevée (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023), comme indiqué dans la représentation schématique ci-dessous (Umicore, 2010).

⁵⁶ La principale difficulté de ce procédé est la gestion des effluents liquides, générés en grandes quantités et difficiles à traiter. La pyrométallurgie reste donc essentielle (ex. extraction de l'or) et l'hydrométallurgie n'est développée que pour une faible part des matières collectées, lorsque les concentrations sont très importantes (Terra Nova Développement, 2024).

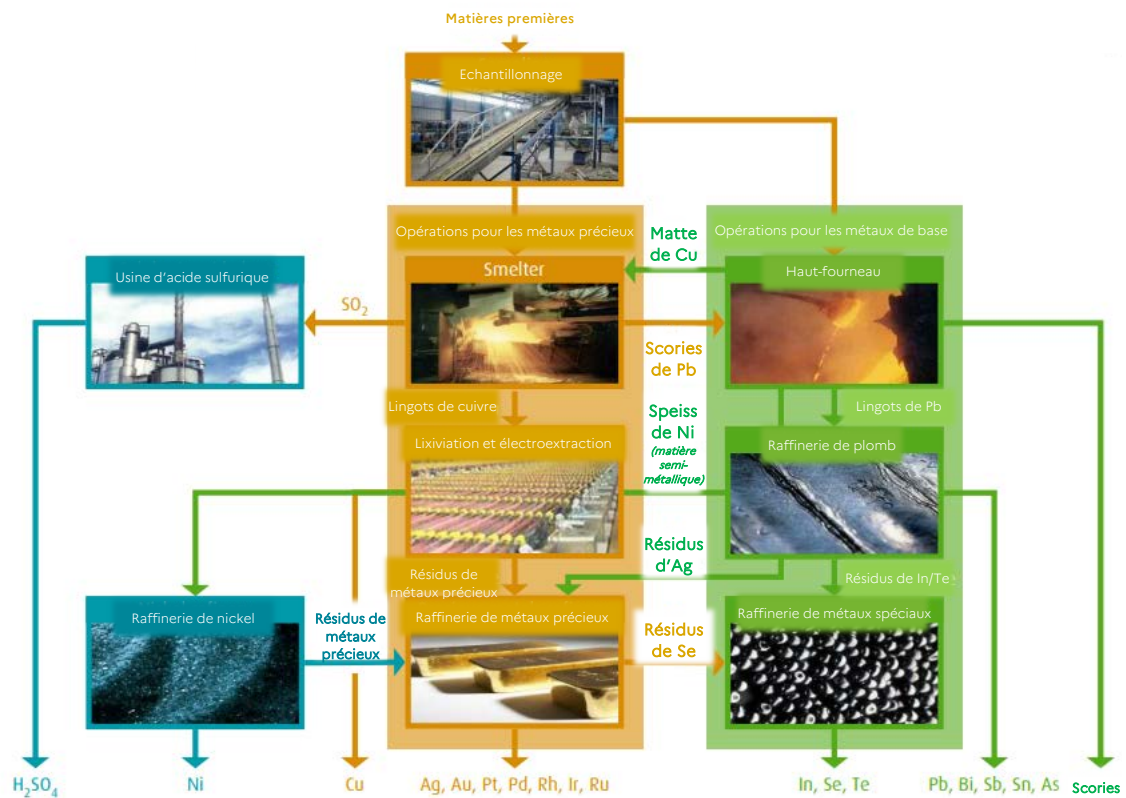


Figure traduite de l'anglais au français.

Figure 27 : Représentation schématique des procédés de récupération des métaux des cartes électroniques d'Umicore (Umicore, 2010)

- Les métaux récupérés dans les cartes électroniques ne sont généralement pas recyclés en boucle fermée.

Certaines matières premières de recyclage métalliques sont indirectement réincorporées en boucle fermée puisque certains récupérateurs de métaux les fournissent à des fabricants de composants, qui sont ensuite utilisés dans des équipements numériques (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

Cependant, les métaux issus des DEEE sont généralement recyclés en boucle ouverte, dans des applications différentes de leur utilisation d'origine. En effet, la demande est très faible pour la réincorporation des métaux en boucle fermée, y compris lorsque ceux-ci ont des taux de pureté très élevés. Plusieurs éléments expliquent cette faible réincorporation des métaux recyclés :

- Les acteurs industriels sont rarement prêts à payer plus pour des matières premières de recyclage (MPR) métalliques, sauf pour le secteur de l'horlogerie et de la joaillerie, sous des conditions spécifiques ;
- La pureté des métaux produits est, dans une moindre mesure, limitée par les opérations de recyclage. Les procédés de certains récupérateurs de métaux précieux permettent tout de même d'atteindre des puretés supérieures à 99,99 % (4N). La pureté des métaux vendus varie selon l'utilisation finale du métal (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023) ;
- Un prix supérieur, dans une moindre mesure, l'or recyclé n'étant par exemple que légèrement plus cher que l'or issu de matières premières vierges.

Cette tendance change très progressivement (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023) et les fabricants d'équipements numériques pourraient être amenés à **incorporer des quantités de plus en plus importantes de métaux recyclés dans une optique de décarbonation** (remarque du COPIL).

4.1.3.3. Acteurs de la valorisation des métaux en recyclage (ou « récupération des métaux »)

- **Il existe plusieurs types de « récupérateurs de métaux » : les principaux fondeurs, les autres acteurs de la récupération et les concentrateurs.**

Comme précisé plus haut, les prestataires en contrat avec les éco-organismes doivent **déclarer les filières aval de leurs fractions métalliques**, ce qui leur permet d'avoir une certaine traçabilité des composants et des métaux qu'ils contiennent. Plusieurs écueils subsistent :

- D'une part, il est difficile de déterminer clairement qui sont les opérateurs finaux qui récupèrent les métaux et sous quelles formes ;
- D'autre part, les composants sont parfois gérés par plusieurs intermédiaires et plusieurs négociants, ce qui complique la traçabilité finale des fractions métalliques. Les transformateurs (fabricants de produits semi-finis) ne sont généralement pas en mesure de mettre en place un système de type « chain of custody » qui leur permettrait d'associer l'origine de chaque lot vendu à leurs différents clients.

Il existe trois types d'acteurs de la récupération de métaux issus d'équipements électroniques, à partir de l'exemple de l'extraction de métaux dans les cartes électroniques :

1. **Les principaux fondeurs** : Il y a une dizaine de principaux *smelters* au niveau mondial (acteurs japonais, coréens, européens et un acteur canadien). Ces acteurs disposent de technologies spécifiques et d'un savoir-faire important dans le traitement des gaz dont la gestion est difficile, en particulier étant donné la diversité des matières entrantes lors du recyclage de DEEE. Ce sont ces acteurs qui font les prix des métaux récupérés ;
2. **Les autres acteurs de la récupération de métaux** : Par exemple, WEEE Cycling a la charge du traitement et de la massification des cartes électroniques et porte un projet de montée en capacité sur la récupération des métaux précieux et du cuivre dans les cartes électroniques⁵⁷ ;
3. **Les « concentrateurs »** : En Europe, plusieurs acteurs ont la charge de concentrer et de préparer les cartes électroniques, notamment en vue de leur exportation. C'est le cas de l'acteur coréen Korea Zinc à Isbergues et Hanwa aux Pays-Bas (Terra Nova Développement, 2024).

En France, les éco-organismes mènent régulièrement des projets conjoints avec des récupérateurs de métaux issus des DEEE (ex. Carester, WEEE Cycling, Terra Nova Développement) dans le but d'améliorer le recyclage des métaux reconnus comme critiques (ecosystem, 2023). Les experts en recyclage des DEEE notent un **effort d'amélioration de la récupération de ces métaux en France** ; selon eux, à l'inverse des grandes fonderies existantes, les procédés des nouveaux acteurs français sont prévus pour être agiles et conçus spécifiquement pour traiter les déchets contenant des métaux, ce qui permet d'optimiser considérablement la récupération des métaux (ecosystem, 2023).

- **A date, de nombreux métaux du périmètre de l'étude sont récupérés en quantité limitée en France et sont davantage récupérés dans d'autres pays européens ou asiatiques.**

Le Tableau 28 présente, pour les 25 métaux du périmètre de l'étude, la **liste des récupérateurs de métaux issus d'équipements numériques**, ainsi que des récupérateurs de premier plan à l'échelle européenne et mondiale. Le détail des sources bibliographiques utilisées, procédés d'extraction et formes des métaux valorisés est présenté dans les fiches spécifiques à chaque métal accompagnant ce rapport.

Selon un acteur du secteur, s'agissant en particulier des cartes électroniques issues de DEEE collectés en France : un tiers environ est traité par WEEECycling, un autre tiers par les autres affineurs européens (Boliden, Aurubis, Umicore) et tiers restant au Japon (WEEECycling, 2023).

⁵⁷ Procédés utilisés par WEEE Cycling : pyrométallurgie (Pyrolyse, fusion, calcination, oxydo-réduction thermique) ; hydrométallurgie ; électrométallurgie (WEEE Cycling, 2023).

Tableau 28 : Liste des récupérateurs de métaux issus d'équipements électroniques en France et dans l'UE

Acteur	Localisation du ou des sites d'extraction	Composant	Sn	Au	Pd	Pt	Ru	Zn	Ag	Co	Li	Ni	Cu	Al
Umicore	Belgique	Batteries							x	x	x			
Umicore	Belgique	Cartes élec.	x	x	x	x	x		x			x	x	
WEEE Cycling	France	Cartes élec.	x	x	x	x	x		x			x		
WEEE Cycling	France	DEEE						x					x	
Aurubis	Allemagne / Belgique	Cartes élec.	x	x	x	x			x			x	x	
Aurubis	Allemagne / Belgique	MPR de cuivre et alliages cuivreux						x					x	
Boliden	Suède	Cartes élec.		x	x	x			x			x	x	
Boliden	Suède	MPR de cuivre et alliages cuivreux						x					x	
Igneo	France	Cartes élec.			x	x			x				x	
AkkuSer Oy	Finlande	Batteries								x		x		
Accurec	Allemagne	Batteries								x	x	x		
Nikkelverk	Norvège	Batteries								x		x		
Nickelhütte Aue	Allemagne	Batteries								x		x		
TES-AMM (ex.Recupyl)	France	Batteries								x	x	x		
SNAM	France	Batteries								x		x		
Eurodieuze (Veolia)	France	Batteries								x		x		
Erasteel	France	Batteries										x		
Montwarke Brixlegg	Autriche	MPR de cuivre et alliages cuivreux											x	
Affimet	France	MPR d'aluminium												x
Affinerie d'Anjou / Sadillek	France	MPR d'aluminium												x
Derichebourg	France	MPR d'aluminium												x
Loiret affinage	France	MPR d'aluminium												x

4.2. Freins à la valorisation en recyclage des métaux issus des (D)EEE

Le Tableau 29 résume un certain nombre de freins identifiés sur la valorisation en recyclage possible des métaux issus des DEEE et les classe selon quatre macro-catégories.

Les freins identifiés dans le cadre de cette étude sont alignés avec ceux du rapport Eurométaux (2022) et du rapport CEWASTE (2021).

Tableau 29 : Nature des freins à la valorisation en recyclage des métaux issus des (D)EEE

Type de freins	Technologiques	Economiques	Organisationnels	Politiques / Sociaux
Freins liés aux politiques publiques et au fonctionnement de la filière REP				
Freins liés aux politiques publiques et au fonctionnement de la filière REP			x	
Incertitude sur le recyclage réel des métaux et le niveau de granularité des données	x		x	

Type de freins	Technologiques	Economiques	Organisationnels	Politiques / Sociaux
Freins liés à la collecte				
Exportation de DEEE et de composants de DEEE vers des pays hors UE		x	x	x
Freins liés à la thésaurisation et à l'hibernation des DEEE				x
Freins liés au tri des DEEE et à l'extraction des composants pour recyclage				
Difficultés rencontrées dans la filière pour le réemploi et la réutilisation des EEE		x	x	x
Effets du reconditionnement sur la disponibilité en recyclage des métaux		x	x	
Complexité du traitement de certains DEEE	x	x	x	
Freins liés à la valorisation en recyclage				
Conflits de récupération entre métaux	x	x		x
Efficacité de tri améliorable et obstacles vers la pureté des métaux récupérés	x	x		
Faible rentabilité économique de l'extraction de certains métaux du périmètre de l'étude	x	x		

4.2.1. Freins liés aux politiques publiques et au fonctionnement de la filière REP

4.2.1.1. Incertitude sur le recyclage réel des métaux et le niveau de granularité des données

Les données disponibles à date ne permettent pas d'analyser en profondeur le recyclage des métaux des équipements du secteur du numérique.

- **Tout d'abord, les taux de recyclage sont calculés par flux et non par type d'équipement.**

Les éco-organismes collectent et traitent les déchets ménagers en six flux distincts (Gros électroménagers froid ; Gros électroménagers hors froid ; Ecrans ; Lampes ; PEM ; PAM IT). Au sein d'un même flux, les équipements sont traités en mélange ; **les éco-organismes ne disposent donc pas de taux de recyclage et de valorisation spécifiques par équipement.** Certains sites de traitement de DEEE mettent en place des campagnes de traitement (ex. box internet), mais celles-ci sont aujourd'hui marginales.

Pour autant, ecosystem mène depuis plusieurs années un programme de connaissance des gisements de DEEE lui permettant d'appréhender la composition matière des équipements collectés (ecosystem, 2023).

- **Ensuite, les données concernant la nature, la quantité et surtout la destination finale des métaux ou alliages effectivement récupérés restent encore lacunaires.**

Les opérateurs de recyclage fournissent certaines données aux éco-organismes sur demande, mais leur niveau de détail n'est pas suffisant pour dresser un tableau solide de la situation à date⁵⁸.

⁵⁸ Cet élément doit être nuancé eu égard aux récentes obligations de traçabilité et de déclaration pour la filière DEEE – par exemple l'Arrêté du 12 décembre 2022 relatif aux données des filières à responsabilité élargie des producteurs – dont les bénéfices ne seront perceptibles qu'à moyen terme (Ecologic, 2023).

De plus, dans le cadre de la collecte et de la réparation des DEEE, les éco-organismes rapportent une granularité d'information qui n'est pas la même que celle du périmètre de cette étude, puisqu'il n'y a pas de raison économique ou opérationnelle pour qu'ils le fassent. Ils répartissent les différents appareils :

- En fonction de leurs obligations réglementaires – la collecte de données plus précises entraînerait des coûts supplémentaires ;
- En fonction de la facilité de tri permise par leurs machines de traitement.

Pour analyser la fin de vie par métal et par équipement, il est parfois **nécessaire d'utiliser des hypothèses de quantités de métaux présents dans les composants** (ex. cartes électroniques) ou de considérer que la fin de vie d'un équipement est la même que celle de la catégorie d'EEE dont il fait partie (ADEME, 2023 et Ecologic, 2023).

- **Enfin, il existe un « frein de connaissance » des gisements de métaux.**

Il est indispensable d'avoir une connaissance suffisante des gisements potentiels et de leur localisation pour calibrer les procédés de traitement. Or, les méthodologies adéquates pour estimer et mesurer ces stocks sont à définir. Par exemple, **aucune méthode normalisée n'a été définie concernant l'échantillonnage et l'analyse des cartes électroniques** et des métaux critiques qu'elles contiennent (ecosystem, 2023), ce qui représente un enjeu économique majeur pour la filière DEEE.

4.2.1.2. Freins liés à la collecte et à l'export de DEEE et de composants de DEEE vers des pays hors UE

De nombreux DEEE et composants de DEEE sont exportés hors UE pour plusieurs raisons, notamment :

- **Economiques.** Selon un expert de la récupération des métaux dans les DEEE, l'un des principaux freins à la récupération des métaux en France et en Europe est le phénomène de fuite des matériaux (*materials leakage*). Selon certains acteurs, il serait parfois plus avantageux économiquement pour les entreprises de collecte des DEEE d'exporter légalement les composants de DEEE vers des pays extérieurs à l'Union européenne que de les valoriser en France ou dans l'UE. Ces matériaux sont notamment exportés vers le Japon et la Corée du Sud (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023) ;
- **Techniques.** L'industrie métallurgique française ne dispose pas encore d'une capacité suffisante pour récupérer tout le métal contenu dans ses DEEE sur le marché national. Une part importante est encore envoyée à l'étranger pour être récupérée dans de grandes fonderies de cuivre, notamment en Asie du Sud-Est (Thomas, 2020). Par exemple, Igneo France pyrolyse des cartes électroniques, puis envoie le produit intermédiaire (contenant du cuivre, du palladium, du platine et de l'argent non affinés) en Corée, où est réalisé l'affinage de métaux (WEEE Cycling, 2023) ;
- **Liées aux filières illégales.** Ces filières représentent encore une part importante à l'échelle mondiale (Danino-Perraud, 2020) ; il est estimé que 40 % des cartes électroniques françaises sont exportées (COMES, 2020). Les équipements et composants que ces filières récupèrent sont généralement recyclés car elles y trouvent un intérêt économique⁵⁹ (remarque du COPIL).

4.2.1.3. Freins liés à la thésaurisation et à l'hibernation des DEEE

Des volumes importants de DEEE sont disséminés dans les foyers, comme l'indiquent les enquêtes Ipsos 2016 et CSA 2020. Selon l'OCAD3E, **environ 7 % du parc d'EEE en France est stocké** – autour de 1,3 million de tonnes⁶⁰ – réparti à parts égales entre les appareils conservés pour être réutilisés ultérieurement (**hibernation**) et ceux qui attendent d'être jetés (**thésaurisation**) (OCAD3E, 2021).

⁵⁹ Toutefois, les conditions socio-environnementales de ce recyclage n'ont pas été étudiées dans le cadre de cette étude.

⁶⁰ Ce chiffre doit être relativisé car les équipements numériques ne représentent qu'une faible part des 1,3 millions de tonnes des équipements électriques et électroniques.

La **Figure 28**, extrait du rapport OCAD3E de 2021, montre la quantité d'équipements – écrans et PAM IT, qui regroupent la plupart des équipements du numérique – par rapport au stock d'EEE actuellement utilisés. Bien qu'ils ne représentent qu'une très faible part du parc en service, l'étude indique que « si l'ensemble des appareils actuellement thésaurisés était mis au rebut au cours d'une année donnée, cela augmenterait le gisement d'environ 40 % pour cette année » (OCAD3E, 2021).

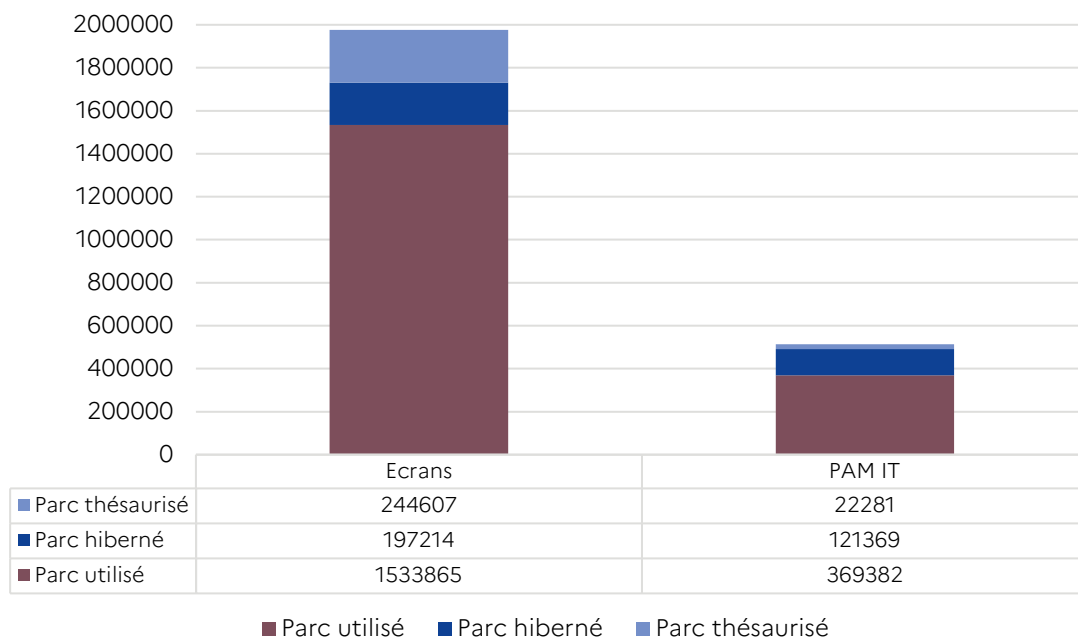


Figure 28 : Statut des appareils dans le parc de DEEE (CAT 02 et CAT 06) en 2019. Volume du parc estimé selon méthode MC+, statut d'utilisation selon enquêtes détenteurs Ipsos et CSA 2020 (OCAD3E, 2021)

Le phénomène de thésaurisation des DEEE est expliqué par un **frein économique et « émotionnel » à la collecte** des équipements en fin de vie pour certains équipements IT (smartphones, tablettes, ordinateurs portables, consoles de jeux vidéo de salon). Les consommateurs reconnaissent des difficultés à se séparer de ces équipements en raison de leurs prix élevés à l'achat, de leur potentiel de revente dans des filières alternatives et de la valeur sentimentale des données présentes dans ces équipements (ecosystem, 2023).

4.2.2. Freins liés au tri des DEEE et à l'extraction des composants pour recyclage

4.2.2.1. Difficultés rencontrées dans la filière pour le réemploi et la réutilisation des équipements numériques

- Les structures de réemploi et de réutilisation des EEE/DEEE font face à des difficultés économiques, logistiques et politiques.

Une liste des difficultés auxquelles les structures de réemploi-réutilisation font face a déjà été dressée par une étude de l'ADEME en 2017, et approfondie dans une étude ultérieure en 2021 (ADEME, 2021b). Voici un tableau récapitulatif des principaux points :

Tableau 30: Synthèse des difficultés rencontrées et exprimées par les 38 structures visitées (ADEME, 2021b)

1. Difficultés communes à tous les profils de structures	Déficit d'image du produit de « seconde main »
	Transmission des compétences au sein de la structure
2. Difficultés spécifiques aux acteurs s'approvisionnant hors achat (dons, abandons etc.)	Maitrise fréquemment aléatoire des approvisionnements
	Suivi de l'activité et traçabilité non optimisés
	Locaux non suffisamment adaptés pour répondre à un besoin croissant de l'activité
	Manque de ressources financières pour pérenniser et/ou développer l'activité
3. Difficultés spécifiques aux acteurs s'approvisionnant par achat	Trop forte dépendance envers les politiques publiques
	Baisse de qualité du gisement
	Arrivée de nouveaux acteurs sur le marché

D'autres sources confirment les différents points du Tableau 30. Un goulot d'étranglement demeure **l'approvisionnement en équipements usagés fonctionnels par les centres de réemploi**, auprès d'entreprises et particuliers. S'agissant des particuliers, selon une étude Kantar TNS de 2020, si 81 % des détenteurs de téléphones achetés neufs se disent prêts à le revendre à un professionnel du réemploi, seuls 19 % sont passés à l'acte (Kantar TNS, 2020).

- **Par ailleurs, le cadre réglementaire actuel ne priorise pas le réemploi et la réutilisation des EEE/DEEE par rapport au recyclage des DEEE**

Dans la directive DEEE de 2012, les objectifs de traitement des DEEE – tels qu'ils sont présentés dans le Tableau 43 – ne donnent **pas d'objectif chiffré en termes de DEEE à réemployer ou réutiliser** avant de passer à l'étape finale du recyclage. A la place, ils donnent des objectifs minimaux valables à partir de 2019 pour :

- La réutilisation et le recyclage⁶¹ sans différenciation ;
 - La valorisation, qui comprend le recyclage, la valorisation énergétique, la réutilisation par pièces et la préparation à la réutilisation.
- **En conséquence, les équipements du numérique sont très faiblement réemployés et réutilisés aujourd'hui.**

En 2022, **seuls 2,2 % des (D)EEE collectés par un des éco-organismes sont réemployés et 0,7 % sont réutilisés**, comme l'indique le Tableau 31. Parmi les flux de DEEE contenant la majorité des équipements numériques (écrans ménagers et professionnels, petits appareils ménagers et professionnels, GEM HF professionnels), seuls quelques catégories d'EEE ont des taux de réutilisation/réemploi plus élevés :

- Les écrans ménagers (ex. tablettes, ordinateurs portables) ont un taux de réemploi/réutilisation de 5,6 %, majoritairement en raison d'écrans qui sont déclarés aptes à la réutilisation au niveau du point de collecte ou lors des différentes étapes de tri. Les agents mettent alors l'appareil de côté s'il paraît en bon état ;
- Les téléphones sont parfois réemployés grâce à des collectes spécifiques (Ecologic, 2023) ;
- Les gros équipements professionnels hors froid (ex. serveurs) sont proportionnellement plus réemployés que les autres équipements (8,3 %). Selon l'OCAD3E, les serveurs font partie des équipements professionnels pour lesquels les enjeux de réemploi, notamment à l'export, sont les plus importants (OCAD3E, 2021)⁶².

La réutilisation de sous-composants en tant que pièces détachées est également réalisée à la marge (Ecologic, 2023).

⁶¹ Les définitions sont énoncées à l'article 3 de la directive 2008/98/CE.

⁶² Les taux de réemploi et de réutilisation des DEEE sont issus d'estimations. Ils présentent donc des limites de représentativité du gisement total (Ecologic, 2023).

Tableau 31 : Taux de réemploi et de réutilisation des différents types de DEEE en France en 2022 (Ecologic, 2023)

Flux		Réemploi	Réutilisation
EEE ménagers (2022)	Ecrans	0,8 %	4,8 %
	PAM	2,1 %	0,8 %
Total EEE ménagers (2022)		1,5 %	0,7 %
EEE professionnels (2022)	Ecrans	0,0 %	0,0 %
	GEM HF	8,3 %	0,0 %
	PAM IT	3,8 %	0,2 %
Total EEE professionnels (2022)		4,9 %	0,6 %
Total général (toutes catégories)		2,2 %	0,7 %

4.2.2.2. Effets du reconditionnement sur la disponibilité en recyclage des métaux issus des équipements numériques

Le développement du reconditionnement de certains équipements a un effet significatif sur la disponibilité des métaux issus des équipements du secteur du numérique en vue de leur recyclage. De même que le réemploi et la réutilisation, **le reconditionnement repousse dans le temps la disponibilité au recyclage des équipements numériques en fin de vie**. Toutefois, il s'agit seulement d'un décalage dans le temps : si la quantité de métal disponible au recyclage issus d'équipements en fin de première vie pour une année donnée est réduite, les équipements reconditionnés dans les années précédentes peuvent eux être mis au rebus en fin de deuxième vie, venant ainsi augmenter la quantité de métaux disponibles en recyclage pour cette même année. Par ailleurs, en suivant la logique de la hiérarchie des déchets⁶³, le reconditionnement est préférable d'un point de vue environnemental.

Le cas des smartphones illustre en particulier cet effet – cf. focus ci-dessous. A noter cependant que les smartphones sont une catégorie d'équipements numériques dont la part du reconditionnement en fin de vie serait particulièrement importante : 22 % des répondants à une enquête menée pour Ecologic avaient déjà acheté un smartphone reconditionné, les ordinateurs arrivant en deuxième position mais avec 5 % des répondants seulement (Ecologic, 2023).

Focus sur le reconditionnement des smartphones

L'éco-organisme Ecologic estime qu'au total, entre **10 et 20 %** des téléphones non-utilisés sont **revendus pour reconditionnement** (Ecologic, 2023)

Dans le cas des smartphones, les effets du marché de l'occasion se traduisent d'abord dans les comportements d'achat. Une étude de 2023 montre que 39 % des ménages en France ont déjà acheté au moins un téléphone reconditionné ou d'occasion. Ils se traduisent également dans les comportements de gestion d'anciens téléphones en fin de vie : si la majorité des téléphones détenus sont gardés – respectivement 68 % et 50 % pour le dernier et l'avant dernier téléphone détenu –, l'avant-dernier téléphone utilisé peut être recyclé (18 %), donné (16 %), vendu (9 %), jeté à la poubelle (3 %) ou être dirigé vers d'autres exutoires (4 %) (Toluna, Harris Interactive et Crédoc, 2023).

4.2.2.3. Complexité du traitement de certains DEEE et de la récupération de certains composants

- **Les étapes de démantèlement et de broyage peuvent entraver le recyclage de certains composants tels que les batteries.**

Pour le démantèlement : Selon un expert en recyclage des DEEE, les piles et accumulateurs issus du démantèlement des DEEE sont très souvent abîmés et/ou cassés. Cela perturbe l'identification de la composition chimique et conduit à des risques de départ de feu et d'émanation de métaux (Corepile,

⁶³ En particulier telle que prévue à l'art. 4 de la Directive 2008/98/CE relative aux déchets (dite « directive-cadre déchets »).

2023). Ce phénomène devrait diminuer car la réglementation européenne sur les batteries devrait contraindre les fabricants à mettre sur le marché des appareils dont les batteries sont extractibles à partir de 2024 avec un délai de trois à quatre ans (sauf dérogations pour certains appareils plats telles que les tablettes ou les objets connectés IoT) (Corepile, 2023).

Pour le broyage : Selon un autre expert, lorsque cette étape utilise des machines fonctionnant à grande vitesse, cela produit plus de poussières résiduelles ce qui, par conséquent, réduit le taux de recyclage des DEEE du secteur du numérique (WEEE Cycling, 2023). Une partie des métaux ne seraient alors pas recyclés et seraient « perdus » dans les fractions fines de broyage.

- **Les DEEE du secteur du numérique sont également complexes à traiter en raison de leurs compositions spécifiques.**

Les entreprises chargées de l'extraction des métaux du périmètre de l'étude ont besoin de **flux concentrés et en quantités suffisantes** pour que la récupération des métaux soit techniquement et économiquement réalisable (Terra Nova Développement, 2024). Tous les équipements IT contiennent des concentrations intéressantes de métaux⁶⁴, mais leur **traitement en mélange** avec des DEEE non-IT (ex. petits équipements ménagers) dilue ces concentrations. Le problème est d'autant plus important que certains métaux ne sont présents qu'en volumes très faibles (WEEE Cycling, 2023 et Terra Nova Développement, 2024).

Cela peut notamment être lié à :

- **Une quantité importante de plastiques** : Par exemple, les ordinateurs portables contiennent une proportion importante de plastiques et de composants qui sont plus complexes à recycler. C'est le cas des afficheurs LCD sont difficiles à traiter et généralement incinérés ;
- **La présence de retardateurs de flammes** : Par exemple, pour les écrans, les plastiques rendus denses par la présence de retardateurs de flamme sont difficiles à trier (Ecologic 2023).

- **Ensuite, les DEEE du secteur du numérique sont complexes à traiter en raison de leurs tailles**

Les très petits appareils en mélange (ex. objets connectés IoT) ont des formes et des tailles très diverses, et certains d'entre eux ne sont parfois pas récupérés lors des étapes de tri pré-broyage⁶⁵ (Ecologic, 2023). Par exemple, les écouteurs sans fil contiennent des aimants de plus en plus performants, riches en néodyme et praséodyme, mais qu'il n'est pas possible de récupérer avec les technologies actuelles. Ce frein est de plus en plus important avec la miniaturisation des équipements (ecosystem, 2023).

Ce frein s'applique à la fois aux petits appareils et aux **éléments broyés trop finement**, telles que les piles et les batteries qui peuvent être abimées et ne sont alors plus isolées. Elles « quittent » alors le procédé de recyclage des métaux des DEEE (Corepile, 2023).

Les gros DEEE professionnels (ex. serveurs) nécessitent des procédés de recyclage plus complexes. Les opérateurs chargés de leur traitement doivent être formés à ces procédures, en particulier si l'équipement contient des substances dangereuses ou s'il est traité pour la première fois. Cela entraîne des coûts plus élevés et des délais de traitement plus longs (ADEME, 2021 ; Ecologic 2023).

- **Enfin, même lorsque les équipements sont recyclés, les métaux étudiés se concentrent dans des composants compliqués à extraire ou dont les modalités d'extraction sont peu connues.**

Selon un expert du recyclage des DEEE, si certains projets d'extraction de métaux se focalisent sur le recyclage à partir de composants et/ou de concentrés métalliques, **l'extraction du composant lui-même est souvent oubliée** et/ou étudiée trop tardivement (ecosystem, 2023).

⁶⁴ Plus les équipements ont des capacités de calcul, plus ils ont des capacités conductrices et plus les taux de concentration en métaux précieux sont élevés (WEEE Cycling, 2023). C'est le cas des équipements du secteur du numérique.

⁶⁵ Ce frein pourrait s'accroître avec le développement de l'IoT. Ces équipements, qui sont à date très peu collectés car très récents, sont très intégrés et miniaturisés (ecosystem, 2023).

Selon un autre acteur, **l'écoconception** (*design for recycling*), avec des composants plus facilement séparables pendant le démantèlement et le *pre-processing*, **n'est pas généralisée à tous les composants et à tous les équipements numériques** (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023). Par exemple, si les pièces sont trop soudées entre elles ou trop petites, alors il n'est pas possible de les séparer correctement car elles ne sont pas extractibles avant le broyage et/ou qu'un broyage plus fin limiterait les possibilités de récupération. C'est le cas des smartphones et des tablettes, dont les batteries peuvent être scellées (ecosystem, 2023).

4.2.3. Freins liés à la valorisation en recyclage

4.2.3.1. Conflits de récupération entre métaux

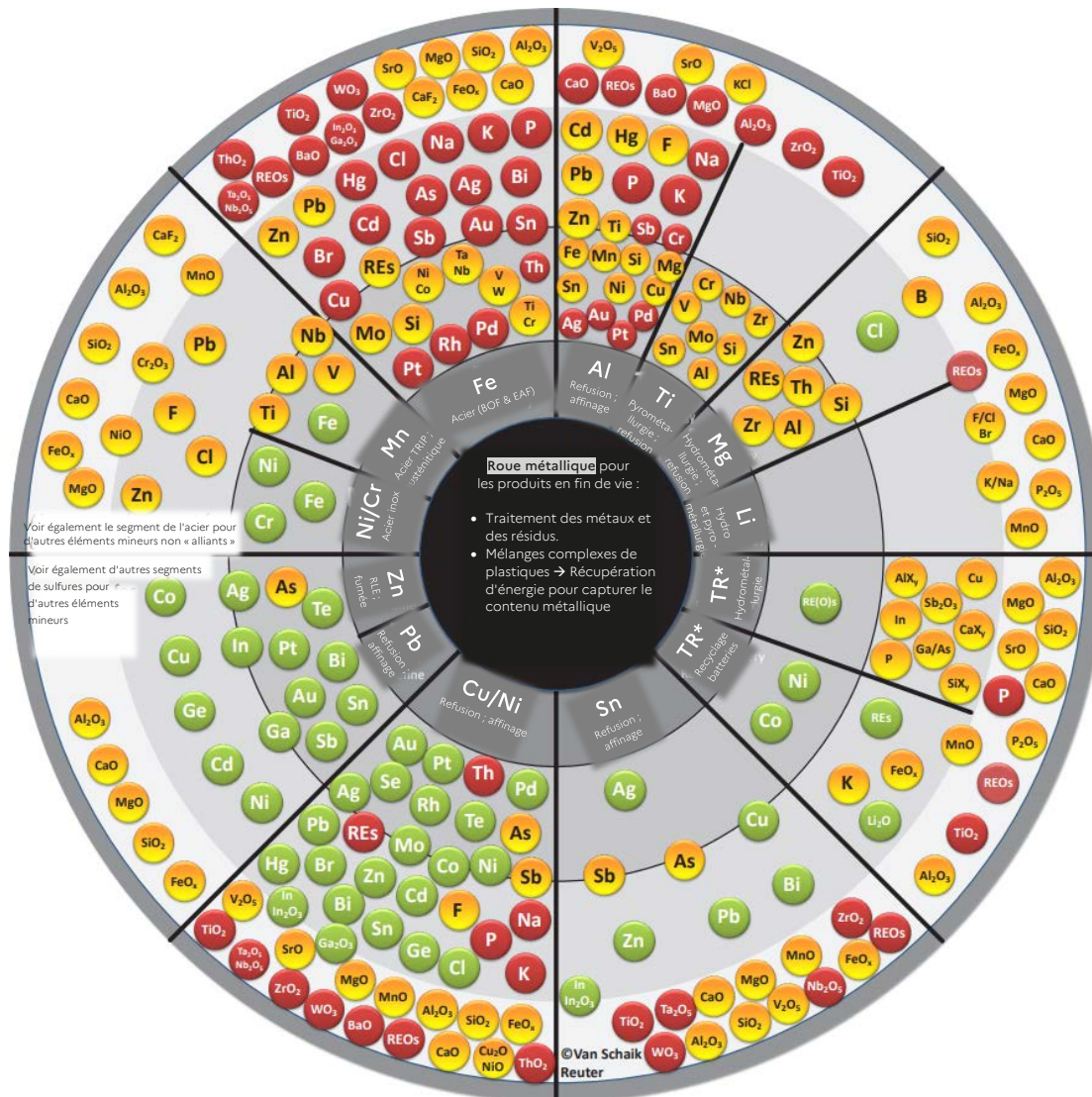
Contrairement aux métaux de base (ex. acier, aluminium), **certains métaux du périmètre de l'étude sont présents en très faibles quantités** et sont dispersés dans divers composants. Pour un même équipement, leurs concentrations sont très variables d'un modèle à l'autre et d'une marque à l'autre (ecosystem, 2023). Or, plus la concentration d'un métal est faible, plus la part récupérable est faible. La difficulté réside alors dans l'extraction de ces métaux lors de l'affinage.

- **D'une part, d'un point de vue technique, l'extraction d'un métal se fait parfois au détriment d'un autre car certains processus de récupération ne sont pas compatibles** (ecosystem, 2023).

Comme l'indique la Figure 29 (« Metal Wheel »), à partir de chaque métal porteur, certains autres métaux peuvent être récupérés par différentes voies, tandis que d'autres sont rejetés dans des flux de sortie ou sous des formes qui ne permettent pas actuellement la récupération (ex. métaux oxydés dans le laitier). Cela signifie qu'en fonction des technologies actuellement disponibles à l'échelle industrielle, des coûts de récupération associés et de l'intérêt porté à certains métaux en fonction des besoins du marché, **certains métaux seront inévitablement perdus et ne seront pas récupérés** à partir de leurs métaux porteurs (Sanders et al., 2019 ; CEDaCI, 2020).

Selon un expert, les possibilités d'extraction des métaux par les principaux récupérateurs de métaux sont **limitées en raison des technologies qu'ils ont déjà déployées**. Par exemple, le *business model* du recyclage des cartes électroniques repose sur des formules d'achat de certains métaux précieux (cuivre, or, argent, palladium) ; les avantages économiques⁶⁶ de l'extraction des métaux des cartes électroniques dépendent donc de la récupération de ces métaux. En l'absence de technologie de rupture sur le recyclage des cartes électroniques, il n'est donc pas envisageable d'augmenter drastiquement le nombre de métaux extraits. C'est le cas du tantale, qui est tellement dilué qu'il est impossible de le récupérer à date ; il est généralement perdu dans les fours (Terra Nova Développement, 2024).

⁶⁶ Ceci est d'autant plus important que la marge brute sur une tonne de DEEE est 5 à 10 fois supérieure à celle réalisée sur une tonne de minerai (Terra Nova Développement, 2024).



Destinations économiquement viables des matières premières de recyclage et autres résidus en fin de vie. Ces matières sont associées à une infrastructure de traitement métallurgique (pour chaque segment) et à la production de métaux raffinés, de composés et d'alliages avec la meilleure technologie disponible.

- Infrastructures de traitement des « métaux porteurs » de l'économie circulaire.**
Il s'agit de facilitateurs d'une économie circulaire car ils permettent également de récupérer les éléments technologiques utilisés (ex. dans les infrastructures d'énergie renouvelable, l'IoT, l'e-mobilité)
- Élément se dissolvant principalement dans le « métal porteur » si métallique (principalement pyrométallurgie)**
Éléments économiquement viables récupérés à partir des métaux porteurs (ou perdus).
- Composés principalement sous la forme de poussières, slimes, speiss (principalement hydrométallurgie)**
Ces éléments sont des collecteurs d'éléments mineurs de grande valeur sous forme d'oxydes/sulfates/chlorures, etc., et principalement récupérés dans des infrastructures appropriées, si économiquement viables.
- Éléments principalement intégrés à des produits et matériaux de construction de faible valeur**
Éléments à la valeur relativement faible mais représentant une partie inévitable du traitement des matériaux. Il s'agit d'une perte pour le système d'économie circulaire sous forme d'oxydes/composés.
- A **Éléments principalement récupérés**
Compatibles avec le « métal porteur » en tant qu'élément d'alliage ou pouvant être récupérés lors d'un traitement ultérieur.
- B **Éléments principalement dans l'alliage/composé, perdus s'ils se trouvent dans un flux de matières premières de recyclage incorrect.**
- C **Éléments principalement perdus, pas toujours compatibles avec le métal porteur ou le produit**
Ils peuvent être nuisibles aux propriétés du métal porteur et/ou ne peuvent pas être récupérés économiquement (ex. l'or dissous dans l'acier ou l'aluminium sera perdu).

Figure traduite en français. *TR : terres rares

Figure 29 : « Roue métallique » de van Schaik et Reuter (2018)

Par exemple, pour les cartes électroniques, plusieurs éléments peuvent contraindre la récupération des métaux précieux :

- La présence d'aluminium en grande proportion complique les analyses et la détermination de la valeur des lots ;
 - Le silicium, présent dans les processeurs ou composants électroniques qui utilisent le carbure de silicium (SiC) se retrouve dans les agrégats et est généralement perdu au cours de l'étape de pyrométallurgie (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).
- **D'autre part, d'un point de vue réglementaire, il existe un risque d'accumulation de cibles ou d'obligations en matière d'économie circulaire pour les DEEE – métaux critiques, plastiques, réutilisation, réemploi, etc. – qui peuvent se concurrencer mutuellement.**

A date, selon un expert de la récupération des métaux, les objectifs réglementaires incitent davantage à un **recyclage basé sur la récupération des matériaux présents en grandes quantités** dans les DEEE du secteur du numérique (acier inoxydable, fer, cuivre et plastiques) (WEEE Cycling, 2023), mettant au second plan la récupération de certains métaux en grande partie récupérés tels que les métaux précieux et au dernier plan les métaux peu à pas récupérés telles que les terres rares. Certains matériaux sont davantage récupérés que d'autres pour répondre aux objectifs réglementaires (recyclage, valorisation, etc.) définis en pourcentage massique global, mais également parce qu'il existe des technologies capables de les récupérer à l'échelle industrielle.

La mise en place de nouvelles réglementations présente néanmoins un **risque d'accumulation de cibles** en matière d'économie circulaire pour les DEEE numériques. Par exemple, pour les batteries, les exigences en termes de taux de réintégration de Matières Premières de Recyclage (MPR) en métaux critiques et d'allongement de la durée de vie pourraient devenir incompatibles. En effet, avec un volume de chutes de productions constant ou qui diminue⁶⁷, pour répondre aux exigences de réintégration de métaux critiques recyclés, il faudrait des batteries avec des durées de vie faibles, ce qui irait à l'encontre d'une vision circulaire des batteries (ecosystem, 2023).

4.2.3.2. Efficacité de tri améliorable et obstacles à la pureté des métaux récupérés

- **En fonction de l'équipement traité, la masse des composants métalliques et des métaux qu'ils contiennent peut varier considérablement.**

Par exemple, pour les cartes électroniques :

- Les métaux sont présents dans une proportion de 25 % à 40 % et leurs « dimensions » varient de quelques microns (ex. placage d'or) à quelques centimètres, rendant l'échantillonnage particulièrement difficile à effectuer (Thomas, 2020) ;
 - Les masses de métaux dans les cartes électroniques peuvent également varier en raison de pertes non négligeables sur les sites de broyage. Elles sont de l'ordre de 15 % dans les pays en développement et de 10 % en France (Thomas, 2020).
- **La présence de substances classées et la classification des DEEE comme déchets dangereux imposent de lourds procédés pour la filière de recyclage des DEEE** (Corepile, 2023).

Selon plusieurs experts de la récupération des métaux, les législations pour limiter les effets négatifs des substances toxiques peuvent avoir des **effets secondaires inattendus et involontaires** sur l'industrie du recyclage. En effet, la présence de substances classées impose de lourds procédés pour la filière de recyclage des DEEE (Corepile, 2023). C'est le cas pour les batteries au lithium, qui présentent un risque de départ de feu et qui doivent donc être extraites en amont de certains procédés de recyclage (ex. avant le broyage), alors que ce n'est pas toujours possible.

⁶⁷ Les chutes de productions peuvent être comptabilisées dans le taux de réintégration de Matières Premières de Recyclage (MPR).

- Les techniques courantes de récupération des métaux telle que la pyroméallurgie présentent également des limites à la récupération des métaux.

Si l'on prend l'exemple des cartes électroniques, en pyroméallurgie, les gaz et l'énergie résultant de la présence de plastiques et de résines dans les cartes électroniques limitent à **10 % des matières entrantes la proportion de cartes que peut traiter un four de fusion** ; il est donc nécessaire de maintenir une part importante de métaux collecteurs tel que le cuivre. Une quantité plus importante entraînerait une perte de combustion optimale et, par conséquent, une perte d'efficacité du processus. Certains métaux sont dilués dans un flux important de matières et sont donc difficilement récupérables. Les métaux présents en faible quantité tels que l'étain, le nickel ou le tantale se retrouvent alors mélangés dans les alliages (Thomas, 2016).

- Par ailleurs, le recyclage des métaux des équipements numériques correspond aujourd'hui à un recyclage en boucle ouverte.

Selon un expert du cycle de vie des équipements numériques, **il y aurait toujours une perte de qualité** – réelle ou perçue – **pour les métaux précieux** (ex. or, argent). A date, seuls le plastique, l'acier et l'aluminium pourraient être réincorporés en boucle fermée. Le recyclage des équipements du numérique et la récupération des métaux qu'ils contiennent ne permettraient généralement pas d'obtenir des puretés suffisantes pour que ces métaux soient réincorporés dans le secteur numérique. Cela signifie que même si 100 % des équipements étaient recyclés, il y aurait toujours besoin de Matières Premières Vierges (MPV) (Etienne Lees-Perasso, 2023 ; remarque du COPIL), d'autant plus que le marché des équipements numériques est en croissance.

Le recyclage en boucle ouverte est plus important pour certains composants que d'autres. Par exemple, il semble possible d'augmenter la part d'aluminium recyclé dans les équipements, tels que les équipements radio des stations de base, même si cette part ne peut pas atteindre 100 % (remarque du COPIL).

Enfin, l'une des limites du recyclage des métaux est la perception erronée de l'économie circulaire, qui suggère un recyclage parfait et infini. En réalité, **chaque cycle de recyclage entraîne une dégradation inévitable de la matière (entropie)**. Ainsi, même lorsque les métaux sont recyclés, il y a toujours une perte de qualité ou de quantité de matière au fil du temps.

4.2.3.3. Faible rentabilité économique de l'extraction de certains métaux du périmètre de l'étude

- La faible rentabilité économique de l'extraction de certains métaux affecte à la fois l'offre et la demande de composants.

D'une part, du côté de l'offre de composants usagés, selon un acteur de la récupération de métaux, il serait parfois **plus avantageux économiquement pour les entreprises de collecte des DEEE d'exporter les composants de DEEE vers des pays extérieurs à l'Union européenne** que de les valoriser en France ou dans l'UE. Des volumes importants de cartes électroniques seraient exportés vers le Japon (ex. Mitsubishi, Dowa) et la Corée du Sud (ex. LS Nikko, Korea Zinc) vers des entreprises spécialisées dans la récupération du cuivre en grande masse, et qui feraient parfois appel à des sous-traitants pour recycler les autres métaux précieux (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

D'autre part, lorsque l'extraction du métal est envisageable techniquement, celle-ci doit être rentable pour être effectuée :

- D'un côté, les projets visant à récupérer les métaux des composants concentrant les métaux étudiés rencontrent des **barrières à l'entrée – économiques et technologiques – sur le marché**. Par exemple, dans le cas des cartes électroniques, une dizaine de principaux fondeurs à l'échelle mondiale (entreprises japonaises, coréennes, européennes et canadiennes) dominent le secteur depuis des décennies, bénéficiant de technologies spécifiques bien établies ;
- D'un autre côté, **la volatilité du prix des métaux influence la viabilité des projets de récupération des métaux du périmètre de l'étude** (remarque du COPIL). Or, les prix des Matières Premières de Recyclage (MPR) pour les métaux ciblés ne sont pas suffisamment compétitifs par rapport à ceux des Matières Premières Vierges (MPV) pour que leur extraction dans la mine urbaine soit pertinente économiquement (ecosystem, 2023). Selon un expert de la récupération

des métaux dans les composants électroniques, la Chine fixe les prix des métaux, qui sont maintenus à des niveaux bas, ce qui rend le processus de récupération des métaux moins rentable. Cela constitue une barrière à l'entrée sur le marché de l'extraction des métaux pour des acteurs de petite taille (WEEE Cycling, 2023).

- **Les métaux de structure et les métaux précieux sont généralement les plus récupérés dans les équipements numériques.**

La Figure 30 illustre ainsi la relation entre la concentration moyenne par équipement⁶⁸ de chaque métal, et le prix du métal en 2020. Les métaux recyclés issus des DEEE – cf. Figure 30 – ont ainsi une position marquée en haut et à droite de la figure en croisant ces deux dimensions – prix et concentration dans l'équipement :

- Les **métaux de structure et conducteurs**, les plus concentrés dans les équipements, avec un prix plus bas (aluminium, cuivre), avec une incertitude sur leurs éléments d'alliage (zinc, magnésium) ;
- Les **métaux précieux**, qui ont des prix beaucoup plus élevés et présents en plus faibles concentrations (Au, Pd, Pt) ;
- Les **métaux de batteries**, recyclés inégalement : le nickel et surtout le cobalt sont bien récupérés, à l'inverse du lithium et du manganèse.

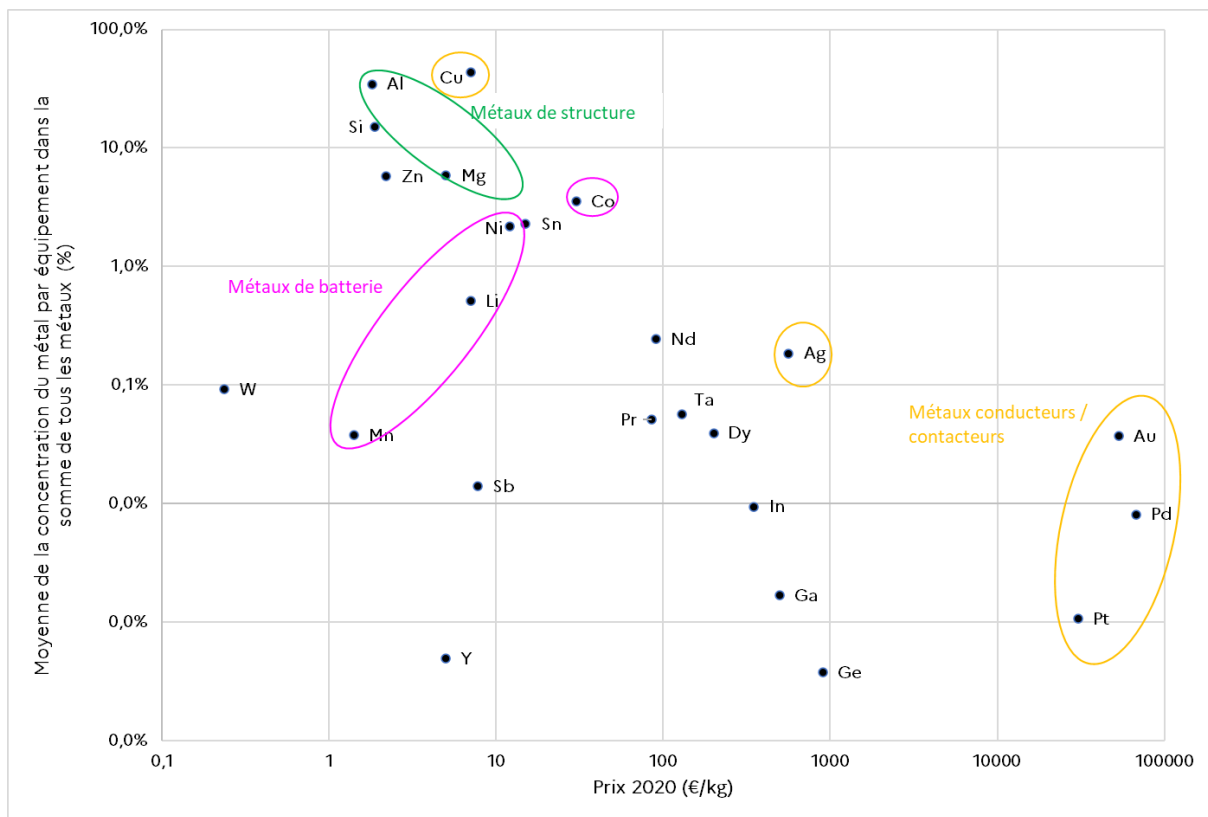


Figure 30 : Relation entre la concentration moyenne par équipement de chaque métal, et le prix du métal en 2020 (Deloitte, d'après diverses données)

Certains métaux ont un prix et une concentration proches de ceux des métaux recyclés – qui sont entourés dans la figure – mais ne sont pas encore récupérés à échelle industrielle dans les DEEE :

- Le **silicium** est difficile à récupérer dans les procédés actuels. Par exemple, le carbure de silicium (SiC) a tendance à se lier avec d'autres matériaux pour former des agrégats au cours de l'étape de pyrométallurgie ; il est donc perdu ;
- Les **terres rares** (Nd, Pr, Dy) entrant dans la composition des aimants ;
- Le **tantale** utilisé dans les condensateurs.

⁶⁸ Cette analyse a été faite en prenant en compte les équipements suivants : téléviseur, smartphone, tablette, ordinateur, écran d'ordinateur, serveur, console, box internet, stockage.

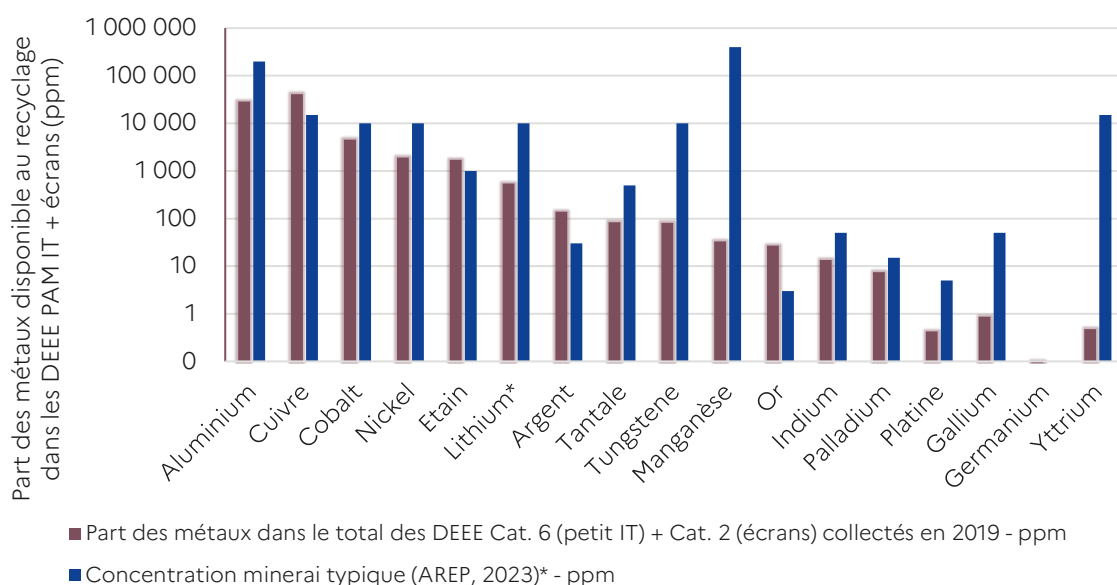
On notera que la Figure 30 reflète les composition matières identifiées dans la bibliographie. Elle est susceptible d'évoluer, par exemple à la baisse d'utilisation de l'or dans les composants et, a fortiori, dans les équipements numériques.

- **La concentration des métaux dans les minerais desquels ils sont extraits est généralement plus élevée que leur concentration dans les flux de DEEE.**

La valorisation en recyclage insuffisante des métaux issus des équipements du secteur numérique peut être également éclairée en **comparant la concentration des métaux dans les flux de DEEE dans lesquels ils se trouvent avec celle des minerais desquels ils sont extraits.**

La Figure 31 compare la concentration des métaux disponibles au recyclage dans les flux de DEEE⁶⁹ aux concentrations de minerais typiques telles que présentée dans AREP (2023) pour tous les métaux. A noter que les métaux issus d'équipements non disponibles au recyclage – calculée selon la méthode exposée en 2.2.3 – ne sont pas comptabilisés dans les quantités estimées en Figure 31⁶⁸.

L'aluminium, le cuivre et le silicium sont les métaux les plus abondants en recyclage (dans les PAM IT et écrans), même si le silicium est faiblement récupéré ensuite. La disponibilité des métaux diminue de manière significative ensuite, avec des métaux tel que le germanium (Ge) se trouvant à l'extrémité inférieure de l'échelle, indiquant leur rareté relative. **Les métaux dont la concentration estimée dans les flux de PAM et d'écrans est supérieure à celle dans les minerais sont actuellement bien récupérés dans les DEEE** (Au, Ag, Cu, dans une moindre mesure Sn).



*La concentration typique en roche dure pour le lithium est issue de SCRREEN (2023).

Figure 31 : Concentration des métaux disponibles au recyclage dans les flux de DEEE (PAM IT et Ecrans) (ADEME, 2021) vs. concentrations typiques dans les minerais (AREP, 2023)




⁶⁹ En 2020 dans les flux collectés suivants : 86 613t en Catégorie 6 - PAM IT, et 62 011t en Catégorie 2 – écrans (ADEME, 2021)

4.3. Récapitulatif des niveaux de recyclage des 25 métaux du périmètre de l'étude

Le Tableau 32 indique de manière qualitative le **niveau de recyclage des 25 métaux du périmètre de l'étude**. La section précédente (4.2.3) présente les freins liés à la valorisation en recyclage d'un point de vue global et les 25 fiches métaux – jointes à ce rapport introductif – présentent les enjeux propres à la récupération de chaque métal.

Alors que les métaux abondants dans les équipements numériques (ex. aluminium, cuivre) et/ou dont la valeur à l'issue du recyclage reste élevée (ex. or) sont très bien recyclés, **près de la moitié des métaux de l'étude ne disposent pas d'une filière industrielle de recyclage** qui permettrait leur réincorporation dans de nouveaux produits.

Tableau 32 : Récapitulatif des niveaux de recyclage de 25 métaux utilisés dans le secteur du numérique

Recyclage performant	Recyclage partiel	Absence de recyclage ou recyclage en voie de développement
 <p>Le recyclage de ces métaux est assuré à l'échelle industrielle en France et/ou dans le reste de l'UE. Des technologies permettant de les récupérer ont été déployées par plusieurs acteurs, qui y trouvent un équilibre économique.</p>	 <p>Des boucles de recyclage existent à l'échelle industrielle pour ces métaux, mais sont peu nombreuses en raison d'un manque de rentabilité économique à leur récupération et/ou de complexités techniques pour les récupérer.</p>	 <p>Le recyclage de ces métaux du numérique est peu ou pas déployé, notamment pour des raisons techniques (faible contenu du métal par équipement), technologiques (absence de procédé performant) ou économiques (faible rentabilité). Plusieurs projets pilotes sont en cours pour certains métaux de la liste ci-dessous.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium • Argent • Cuivre • Nickel • Cobalt • Or • Palladium • Platine 	<ul style="list-style-type: none"> • Antimoine • Etain • Lithium • Ruthénium • Zinc 	<ul style="list-style-type: none"> • Dysprosium • Gallium • Germanium • Indium • Magnésium • Manganèse • Néodyme • Praséodyme • Silicium • Tantale • Tungstène • Yttrium

5. Résultats de l'analyse prospective à 2030 et 2050

La méthodologie de l'analyse prospective est détaillée dans la section 2.3.





5.1. Résultats et enseignements de la modélisation à 2030 et 2050

5.1.1. Présentation des scénarios et des variables utilisés dans l'analyse prospective

5.1.1.1. Rappel des scénarios prospectifs Transition(s) 2050




















L'ADEME a établi un scénario tendanciel et **quatre scénarios prospectifs à 2050**, qui aboutissent tous à la neutralité carbone avec des voies différentes : « *ils ont pour objectif de faire prendre conscience à tout un chacun, quel que soit son niveau de responsabilité et d'implication dans la construction de ce cheminement, de la nature des transformations et des choix à faire* » (ADEME, 2024). Leur application au secteur du numérique est présentée en Tableau 33.

Tableau 33 : Présentation des quatre scénarios 2050 pour le secteur du numérique (d'après ADEME, 2024 et ADEME-Arcep, 2022)





Scénario	 Scénario 1 : Génération frugale	 Scénario 2 : Coopérations territoriales	 Scénario 3 : Technologies vertes	 Scénario 4 : Pari réparateur
Impacts pour le numérique	<ul style="list-style-type: none"> Adoption de conceptions écoresponsables, optimisant la durée de vie et la réparabilité des équipements sans obsolescence logicielle. Mutualisation des équipements numériques, limitant le suréquipement et promouvant les services de location. Écoconception généralisée, incluant la formation systématique dans les écoles d'ingénieurs. Sensibilisation aux pratiques numériques sobres et limitation des loisirs numériques excessifs. Priorisation des services numériques selon leur utilité sociale, avec optimisation pour réduire la consommation d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> Maintien des habitudes de 2020 avec intégration des évolutions technologiques. Optimisation technologique selon les besoins territoriaux (urbain/rural). Analyse des besoins matériels avant acquisition et décentralisation des serveurs. Priorisation des services utiles (économie de ressources, éducation, santé) et promotion des écocestes numériques. Limitation des effets rebonds, accessibilité universelle, et adoption de normes de sobriété numérique et d'écoresponsabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation de numérique écoconçu généralisée pour l'efficacité énergétique et matérielle. Limitation des impacts par évolutions technologiques, non par changements de comportements. Usage intensif du matériel dans tous les services, avec rationalisation et optimisation. Forte consommation de données dans les territoires urbanisés avec accès au très haut débit. Principes d'écoresponsabilité comme norme, avec communication sur l'impact environnemental et le recyclage. 	<ul style="list-style-type: none"> La révolution numérique atteint son paroxysme avec la digitalisation extrême et les interactions virtualisées. Multiplication des équipements numériques pour les ménages, entreprises, et services publics. Villes basées sur les <i>smart cities</i> et <i>smart grids</i>, avec réseaux et algorithmes en blockchains. Fréquence élevée de remplacement des équipements et multiplication des serveurs. Communication axée sur l'impact environnemental et le recyclage, malgré des effets rebonds importants et une société clivée.

Les quatre scénarios ADEME 2050 impliquent **des volumes d'équipements numériques (parc et flux) et des durées de vie différents**. Comme l'indique le Tableau 34, les scénarios « Génération frugale » et « Coopérations territoriales » induisent une diminution/stabilisation du nombre d'équipements et une hausse de leur durée de vie, alors que les scénarios « Technologies vertes » et « Pari réparateur » induisent une hausse modérée/élevée du nombre d'équipements et une durée de vie stable.

Tableau 34 : Hypothèses générales des quatre scénarios concernant le nombre d'équipements numériques (d'après ADEME, 2024 et ADEME-Arcep, 2022)

Scénario	 Scénario 1 : Génération frugale	 Scénario 2 : Coopérations territoriales	 Scénario 3 : Technologies vertes	 Scénario 4 : Pari réparateur
Tier 1 - Terminaux	 Limitation du nombre d'équipements Volume IoT stable Durée d'usage +2 ans	 Volumes stabilisés Durée d'usage +1 an	 Volumes en augmentation modérée (croissance réduite pour les objets connectés)	 Volumes en augmentation selon scénario tendanciel Explosion des équipements connectés
Tier 2 – Réseaux	 Réseaux fixes : Uniquement fibre optique  Mutualisation des points hauts ⁷⁰ + trafic Wifi favorisé	 Réseaux fixes : Uniquement fibre optique  Nombre de points hauts n'évolue plus par rapport à 2020 + trafic WiFi favorisé	 Réseaux fixes : Uniquement fibre optique  Réseaux mobiles : déploiement modéré	 Déploiement important des réseaux
Tier 3 - Datacenters	 Surface IT stable par rapport à 2020 Peu de migration vers le edge computing	 Surface IT en augmentation, mais réduite d'1/4 par rapport au scénario tendanciel	 Surface IT en augmentation, mais réduite de 13 % par rapport au scénario tendanciel Migrations des DC vers des datacenters spécialisés externalisés (services de colocation et/ou Cloud)	 Hausse très importante de la surface IT Migrations des DC vers des datacenters spécialisés externalisés (services de colocation et/ou Cloud)

Légende

 Diminution par rapport à 2020	 Augmentation faible à modérée par rapport à 2020 (scénario tendanciel)
 Stabilisation par rapport à 2020	 Augmentation très importante par rapport à 2020

5.1.1.2. Présentation des dix variables « Métaux et numérique » d'ici à 2030 et 2050

Comme indiqué en section 2.3.3, **dix variables à 2050 ont été identifiées** : cinq variables ont été intégrées à l'étude qualitativement et quantitativement – présentées en section 5.1.1.2.1 – et cinq variables ont été intégrées qualitativement uniquement – présentées en section 5.1.1.2.2.

Par ailleurs, certaines variables, non retenues dans les dix variables à 2050 de cette étude, pourraient faire l'objet de travaux complémentaires (remarque du COPIL) :

- Evolution de la population française : nombre d'habitants, vieillissement de la population, etc. ;
- Conflits d'usage liés à la **double transition énergétique et numérique** à moyen et long terme, puisque les deux transitions vont demander des métaux identiques, en particulier le cuivre ;
- Utilisation du numérique pour piloter les énergies renouvelables ;
- Développement de l'intelligence artificielle – notamment régénérative – et impacts sur les architectures réseaux et les terminaux.
- Autres tendances à long terme : *softwarisation* des réseaux, *cloudification* des réseaux (hausse de la capacité du réseau mondial gérée par le cloud), déploiement des réseaux satellites de télécommunications, véhicules autonomes, informatique quantique à l'horizon 2040/2050, paiement par blockchain, métavers, etc.

⁷⁰ En télécommunications, un « point haut » est un emplacement géographique élevé utilisé pour l'installation d'équipements de transmission, telles que des stations de base.

5.1.1.2.1. Présentation des variables intégrées à l'étude qualitativement et quantitativement

Cinq variables à 2030/2050 ont été intégrées à la modélisation :

- Variable #1 : Baisse de la concentration en or dans les équipements (mesurée en grammes par équipement) ;
- Variable #2 : Baisse de l'utilisation d'aluminium dans les équipements (mesurée en grammes par équipement) ;
- Variable #3 : Remplacement des dispositifs de stockage HDD par des dispositifs SSD ;
- Variable #4 : Remplacement des technologies d'écrans LCD par OLED ;
- Variable #5 : Evolution des technologies de réseaux (2G-4G → 5G → 5G millimétrique et 6G).

Les variables #4 et #5 ont déjà été partiellement modélisées par l'étude ADEME-Arcep et ont été précisées par la présente étude du point de vue de la composition métallique des équipements. Pour les trois autres, trois niveaux de substitution à 2030/2050 ont été identifiées (absence de substitution, substitution modérée ou substitution élevée). Le Tableau 35 récapitule les **trois niveaux de substitution des cinq variables prioritaires « Métaux et numérique 2050 »** lorsque ceux-ci sont applicables.

Tableau 35 : Récapitulatif des niveaux de substitution des cinq variables prioritaires « Métaux et numérique 2050 »

	Variable	Substitution faible <i>(Absence de substitution)</i>	Substitution modérée	Substitution élevée
<i>Variables « incertaines » nécessitant des niveaux de substitution.</i>	Variable #1 : Baisse de la concentration en or dans les équipements	Stabilisation de la concentration en or.	- 40 % d'or par équipement.	- 60 % d'or par équipement.
	Variable #2 : Baisse de l'utilisation d'aluminium dans les équipements	Stabilisation de la concentration en aluminium.	- 25 % d'aluminium par équipement.	- 50 % d'aluminium par équipement.
	Variable #3 : Remplacement des dispositifs de stockage HDD par des dispositifs SSD	Stabilisation de la part de SSD (34 %).	70 % de SSD dans les dispositifs de stockage de datacenters.	90 % de SSD dans les dispositifs de stockage de datacenters.
<i>Variables « certaines »</i>	Variable #4 : Remplacement des technologies d'écrans LCD par OLED	11,7 % d'écrans OLED en 2030/2050 pour les écrans d'ordinateurs et les téléviseurs (ADEME-Arcep, 2022), contre 0 % aujourd'hui, par simplification. 100 % d'écrans OLED pour les casque AR-VR en 2030/2050 (contre 50 % aujourd'hui, par simplification).		
	Variable #5 : Evolution des technologies de réseaux (2G-4G → 5G → 5G millimétrique et 6G).	Non applicable : la répartition entre les technologies de stations de base pour chaque scénario est donnée par l'étude ADEME-Arcep (2022).		

Le Tableau 36 présente chaque variable de manière détaillée.

Tableau 36 : Paramètres de modélisation des cinq variables prioritaires « Métaux et numérique 2050 »

Variable #1 : Diminution de la concentration d'or dans les équipements du numérique	
Type de tendance	Tendance liée aux métaux.
Equipements concernés	Tous équipements hors fibre optique.
Métaux concernés	Or ; cuivre ; palladium.
Quantification et niveaux de substitution	En pratique, on estime une diminution récente d'environ 30 % de la concentration en or dans certains équipements (d'après des données d'experts). Le niveau modéré de substitution a été évalué à 40 % puisque les données de composition métallique retenus dans l'étude sont anciennes et pourraient surestimer le contenu en or des équipements.

Variable #1 : Diminution de la concentration d'or dans les équipements du numérique	
	<p>Dans le cadre de cette étude, on estime que la diminution de la concentration en or induit systématiquement un remplacement de cet or par 95 % de cuivre et 5 % de palladium (Nippon Micrometal, 2022).</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Niveau de substitution faible / Absence de substitution</u> : diminution de la consommation d'or de 0 % par équipement d'ici à 2030 ; • <u>Niveau de substitution modéré</u> : diminution de la consommation d'or de 40 % ; • <u>Niveau de substitution élevé</u> : diminution de la consommation d'or de 60 %. <p><u>A noter</u> : Les fils d'or sont notamment remplacés progressivement par des fils de cuivre dans le cadre de programmes de remplacement de l'or chez les fabricants de semi-conducteurs, principalement pour des raisons économiques. Cependant, dans le domaine des radiofréquences, l'utilisation de l'or est restée incontournable (Entretien avec un expert des composants électroniques, 2024).</p>
Phrase récapitulative de l'hypothèse prospective	D'ici à 2030, la concentration moyenne en or dans les équipements du numérique diminuera de 0 % (substitution limitée), de 40 % (substitution modérée) ou de 60 % (substitution élevée) par rapport aux dernières données disponibles pour tous les terminaux.

Variable #2 : Baisse de l'utilisation d'aluminium dans les équipements	
Type de tendance	Tendance liée aux métaux.
Equipements concernés	Tous équipements hors fibre optique.
Métaux concernés	Aluminium.
Quantification et niveaux de substitution	<p>Plusieurs experts de la fabrication d'équipements numériques interrogés ont mentionné un objectif de réduction de la consommation d'aluminium dans les prochaines années : box TV et internet, stations de base, etc., dans différents usages (ex. dissipateurs de chaleur, boîtiers des équipements) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Niveau de substitution faible / Absence de substitution</u> : diminution de la consommation d'aluminium de 0 % par équipement d'ici à 2030 ; • <u>Niveau de substitution modéré</u> : diminution de la consommation d'aluminium de 25 % ; • <u>Niveau de substitution élevé</u> : diminution de la consommation d'aluminium de 50 %. <p>D'une part, dans le cadre de politiques de sobriété matière et de la miniaturisation, la consommation d'aluminium par équipement pourrait diminuer sans être remplacée par une consommation d'autres matériaux, par exemple pour les box internet et TV (Entretien avec un fabricant d'équipements numériques, 2023) ou pour les équipements radio des stations de base (remarque du COPIL). D'autre part, l'aluminium pourrait être remplacé par des matériaux composites. C'est le cas de l'aluminium utilisé dans les boîtiers des stations de base (InfraNum, EKHO, 2024).</p>
Phrase récapitulative de l'hypothèse prospective	D'ici à 2030, la concentration moyenne d'aluminium des équipements du numérique diminuera de 0 % (substitution limitée), de 25 % (substitution modérée) ou de 50 % (substitution élevée) par rapport aux dernières données disponibles pour tous les terminaux. Ce contenu en aluminium n'est pas remplacé par un autre métal du périmètre de l'étude.

Variable #3 : Remplacement des dispositifs de stockage HDD par des dispositifs SSD	
Type de tendance	Tendance liée aux composants/équipements.
Equipements concernés	Stockage.
Métaux concernés	Tous métaux.
Quantification et niveaux de substitution	<p>A date, le nombre de dispositifs de stockage HDD est plus important que le nombre de dispositifs SSD : 66 % de HDD et 34 % de SSD (ADEME-Arcep, 2022). Ce rapport s'inverse progressivement ; certaines sources affirment qu'en 2030, le rapport stockage SSD / stockage total (HDD et SSD) atteindrait 87 % (The Cube Research, 2021).</p> <p>Or, les HDD et les SSD n'ont pas la même composition métallique. Par exemple, les HDD contiennent des quantités plus importantes de terres rares (ex. néodyme, praséodyme, dysprosium) que les dispositifs SSD (cf. Fiche équipement « Stockage »). La composition moyenne des dispositifs de stockage pourrait donc évoluer aux cours des prochaines décennies selon la répartition HDD/SSD.</p> <p>Les volumes de HDD diminueront fortement, mais leur usage sera maintenu dans une moindre mesure, notamment pour des raisons d'efficacité énergétique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Niveau de substitution faible / Absence de substitution</u> : 34 % de dispositifs de stockage SSD en 2030 [niveau actuel] ; • <u>Niveau de substitution modéré</u> : 70 % de dispositifs de stockage SSD en 2030 ; • <u>Niveau de substitution élevé</u> : 90 % de dispositifs de stockage SSD en 2030. <p>Cette tendance est cumulative avec les tendances de réduction d'or et d'aluminium.</p>

Variable #3 : Remplacement des dispositifs de stockage HDD par des dispositifs SSD

Phrase récapitulative de l'hypothèse prospective	D'ici à 2030, une partie des dispositifs de stockage HDD sera remplacée par des dispositifs SSD. La part de SSD pourrait passer de 34 % en 2020 (substitution limitée), 70 % (substitution modérée) ou 90 % (substitution élevée).
--	--

Variable #4 : Remplacement des technologies d'écrans LCD par OLED

Type de tendance	Tendance liée aux composants/équipements.
Équipements concernés	Casque AR-VR ; Téléviseur ; Ecran d'ordinateur.
Métaux concernés	Tous métaux.
Quantification et niveaux de substitution	<p>D'après le projet CEPiR (2024), tous les casques AR-VR seront équipés d'écrans OLED en 2030, contre environ la moitié aujourd'hui. Les données de composition métallique sont issues des analyses de cycle de vie réalisées pour les casques avec un écran OLED, les casques avec un écran LCD et pour les manettes dans le cadre du projet CEPiR. Pour rappel, l'approche de l'ACV n'est pas une analyse de substance. Elle se base notamment sur des données génériques de composants, et donc ne reflète pas exactement la réalité de la composition matière.</p> <p>⇒ Niveau de substitution unique Casque AR-VR : 100 % d'écrans OLED d'ici à 2030 dans tous les niveaux de substitutions</p> <p>D'après le rapport prospectif de l'étude ADEME-Arcep (2022, d'après Omdia), 11,7 % des téléviseurs et des écrans d'ordinateurs seront équipés d'équipements OLED en 2030. A noter : Bien que les écrans LCD représentaient 98,6 % des équipements en 2020, on estime par simplification qu'ils représentaient la totalité des écrans à date.</p> <p>Les changements de composition métallique des écrans LCD et OLED ont été extrapolés à partir des variations de composition entre les écrans LCD et les écrans OLED des casques AR-VR du projet CEPiR (2024).</p> <p>⇒ Niveau de substitution unique Téléviseur et Ecran d'ordinateur : 11,7 % d'écrans OLED d'ici à 2030 dans tous les niveaux de substitution.</p> <p>Pour les casques AR-VR, téléviseurs et écrans d'ordinateurs, cette tendance est cumulative avec les tendances de réduction d'or et d'aluminium.</p>
Phrase récapitulative de l'hypothèse prospective	<p>D'ici 2030 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - D'une part, chaque casque de réalité virtuelle contiendra un écran OLED. Les casques à écran LCD ne seront plus commercialisés. - D'autre part, la part d'écrans OLED pour les écrans des téléviseurs et des moniteurs (écrans d'ordinateurs) atteindra 11,7 %, ce qui modifiera la composition métallique unitaire de ces équipements.

Variable #5 : Evolution des technologies de réseaux (2G-4G → 5G → 5G millimétrique et 6G)

Type de tendance	Tendance liée aux composants/équipements.
Équipements concernés	Réseau d'accès (Station de base).
Métaux concernés	Tous métaux, en particulier le gallium. Selon un expert du COPIL, la hausse de l'utilisation de gallium est notamment liée à ses propriétés exceptionnelles en matière de rendement énergétique (GaAS pour les amplificateurs 4G, 5G).
Quantification et niveaux de substitution	<p>Le nombre de stations de base en 2030 et en 2050 est donné par l'étude ADEME-Arcep (2022) dans un document de travail confidentiel. Ce document indique un nombre de stations de base et la répartition entre les technologies 2G, 3G, 4G, 5G, 5G millimétrique* et 6G.</p> <p><i>*Pour l'instant, l'émergence de la 5G millimétrique est peu observée par les acteurs des télécommunications, qui y voient des investissements très importants et un faible retour sur investissement (remarque du COPIL).</i></p> <p>L'équipe projet a calculé des contenus métalliques moyens pour chaque technologie à partir de ressources bibliographiques (cf. Fiche « Réseau d'accès – Station de base ») :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Station de base 2G, 3G et 4G à partir des travaux de Bieser et al (2020) ; • Station de base 5G à partir des travaux de Bieser et al (2020) et de Kallio et al (2021) ; • Station de base 5G millimétrique et XG (6G) à partir des travaux de Zhang, Scola et Schulman (2023). <p>A partir de la répartition des stations de base par technologie et par scénario et du contenu métallique par technologie, on obtient une composition métallique moyenne pour chaque scénario.</p> <p>A noter :</p> <ul style="list-style-type: none"> • On estime que la durée de vie des stations de base ne change pas ; • Cette tendance est cumulative avec les tendances de réduction d'or et d'aluminium.
Phrase récapitulative de l'hypothèse prospective	<p>D'ici à 2030, une partie des stations de base 2G-4G seront remplacées par des stations de base 5G puis, d'ici à 2050, par des stations 5G millimétrique ou 6G.</p> <p>Ces nouvelles stations de base contribueront à augmenter de manière significative les consommations de gallium et d'yttrium.</p>

5.1.1.2.2. Présentation des variables intégrées à l'étude qualitativement uniquement

Les cinq autres variables à 2050 sont présentées dans le Tableau 37.

Tableau 37 : *Eléments d'analyse qualitatifs de cinq variables « Métaux et numérique 2050 »*

	Eléments d'analyse	Difficultés de quantification de ces variables
<p>Variable n°6 : Transition vers les data centers Edge / High Performance Computing</p>	<ul style="list-style-type: none"> Le edge computing rapproche le traitement des données de l'utilisateur final. Il permet de réduire la latence, d'améliorer la sécurité et la confidentialité des données ou encore d'alléger les réseaux des transmissions de données vers le cloud (ADEME-Arcep, 2022). L'étude ADEME-Arcep (2022) a modélisé les centres de données Edge suivant la configuration des centres de données High-Performance Computing (HPC). En effet, il n'était pas possible de déterminer la configuration spécifique des centres de données Edge, leurs impacts ont donc été modélisés via l'utilisation de la configuration HPC. 	<p><i>Pas de changement de composition matière induit pour les équipements (hypothèse ADEME-Arcep, 2022)</i></p>
<p>Variable n°7 : Hausse de la consommation de GPU dans le cadre du développement de l'IA</p>	<ul style="list-style-type: none"> Le besoin global en métaux des GPU serait modéré à moyen terme car leur besoin resterait relativement limité. D'un point de vue économique, selon un expert : <ul style="list-style-type: none"> Les GPU représenteront une part importante des puces en valeur mais pas en volume. En 2027, la valeur des puces GPU est estimée à 400 milliards de dollars (10 millions de puces). En revanche, le nombre de puces GPU représenterait seulement 0,00067% du marché global des puces, avec un total de 1,5 trillion de puces (700-800 milliards de dollars) prévu pour 2027. En effet, les GPU ont un prix de vente moyen élevé (30 000 dollars par unité), qui est justifié par leur mémoire avancée, leur <i>packaging</i> « sophistiqué » et leur forte demande dans diverses industries en lien avec l'intelligence artificielle (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024). Néanmoins, le besoin unitaire par GPU en métaux sera de plus en plus élevé [bien que la composition métallique des GPU soit peu connue]. En effet : <ul style="list-style-type: none"> D'une part, leur intensité matière augmente (notamment en lien avec la hausse de la finesse des gravures⁷¹, avec des transistors de dimension 3 nm, voire 1,8 nm pour les nouveaux procédés). D'autre part, la taille de ces puces augmente, jusqu'à 900mm² pour les nouvelles puces Nvidia (remarque du COPIL). Cette tendance est conditionnée au développement des data centers. D'après le COPIL de l'étude, au cours des 18 derniers mois, le développement des data centers a été nettement plus élevé que ce qui avait été prévu par l'étude ADEME-Arcep (2022). Cette tendance serait d'autant plus d'actualité qu'un projet de loi prévoit de faciliter l'installation des centres de données. A noter : La hausse de la puissance informatique ne concerne pas que les data centers. Par exemple, le smart IoT pourrait être plus dense en électronique que ce qui était prévu initialement. L'IA pourrait également « migrer » dans d'autres équipements que les serveurs, tels que les ordinateurs portables, l'IoT et les smartphones. Cet horizon est lointain et reste incertain (remarques du COPIL). 	<p><i>Peu ou pas de changement de composition matière induit pour les équipements</i></p>
<p>Variable n°8 : Centralisation / virtualisation des réseaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> La virtualisation (ou cloudification) des fonctions réseaux consiste à « porter » les fonctions réseaux sur des infrastructures tierces voire banalisées (similaires à des serveurs). Ces changements sont en cours sur les fonctions cœur et se développent progressivement sur le réseau d'accès (InfraNum, EKHO, 2024). Dans le cadre de la 5G, la virtualisation met en œuvre le <i>network slicing</i>, concept permettant d'allouer dynamiquement les ressources nécessaires à un type de services, en fonction de ses besoins de performance (ADEME-Arcep, 2022). La virtualisation des réseaux aura peu d'impact sur le contenu en métaux des stations de base. En effet, les unités de calcul digital en bande de base (BBU) ne seraient plus installées sur site mais dans des lieux tiers (similaires à des data centers), ce qui ne changerait pas la composition métallique totale des stations de base (remarque du COPIL). 	

⁷¹ La gravure est un procédé qui consiste à retirer les couches de substrat à l'aide d'un acide. Dans l'industrie du semi-conducteur, pour la fabrication des composants électroniques, la lithographie est le procédé le plus utilisé.

	Eléments d'analyse	Difficultés de quantification de ces variables
<p>Variable n°9 : Baisse de la consommation d'étain pour certains équipements (hors brasage des CMS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Selon un fabricant d'équipements numériques, l'étain est de moins en moins utilisé dans les différents composants. Il est utilisé dans le cadre du brasage à l'étain de composants montés en surface (CMS). L'autre technique de brasage – <i>through hole</i> – est un procédé très énergivore, qui se raréfie (Entretien avec un fabricant d'équipements numériques, 2023). Il reste toutefois très utilisé dans les soudures, dans lesquelles il a remplacé le plomb ; la soudure représente la plus grande part mondiale de l'utilisation de l'étain (50 % en 2022 – International Tin Association, 2023). • Aucun expert interrogé (et aucune donnée bibliographique) n'a été en mesure d'estimer la baisse de la consommation d'étain dans les équipements numériques. • Par ailleurs, cette baisse ne pourrait être que conjoncturelle. D'après l'International Tin Association (2023), « Le déclin moyen mondial de l'utilisation d'étain raffiné dans ce secteur a été de -1,8 % [en 2022], avec un effet plus important hors de la Chine. Les prévisions pour 2023 reflètent une performance plus forte que prévu, compensant les pertes dans les segments de consommation par des gains dans les secteurs de la technologie et de l'industrie pour atteindre une stabilité de 0,4 % » et mentionne des « perspectives à plus long terme d'une augmentation de l'utilisation dans le solaire, la 5G, les véhicules électriques et d'autres nouvelles technologies ». 	<p><i>Données insuffisantes</i></p>
<p>Variable n°10 : Densification des modules, puces et micro-processeurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les cinq prochaines années verront un changement significatif vers des GPU haute puissance et haute densité optimisés pour les applications d'IA générative. Au-delà de 2030, le défi réside dans le maintien de la tendance à la miniaturisation des puces. Cela implique d'explorer de nouveaux matériaux et techniques pour continuer à faire avancer la loi de Moore (passage à l'échelle atomique), garantissant ainsi la poursuite des progrès dans la miniaturisation des semi-conducteurs (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024). • Les procédés et résultats de la densification des modules, puces et micro-processeurs étant encore incertains, cette variable n'a pas pu être quantifiée. 	

5.1.2. Résultats de la modélisation à 2030/2050

5.1.2.1. Hypothèses de l'analyse prospective – Nombre et types d'équipements en 2030 et en 2050

La Figure 32 présente le **nombre total d'équipements** pour l'état des lieux, le scénario tendanciel 2030 et cinq scénarios à 2050. Les parcs des vingt équipements⁷² du périmètre de l'étude sont estimés par l'étude ADEME-Arcep (2022) ou via une autre source (cf. méthodologie, section 2.3.2).

⁷² Pour les besoins de ce rapport, pour la fibre optique, par simplification, on estime qu'un kilomètre de brin de fibre optique correspond à un équipement.

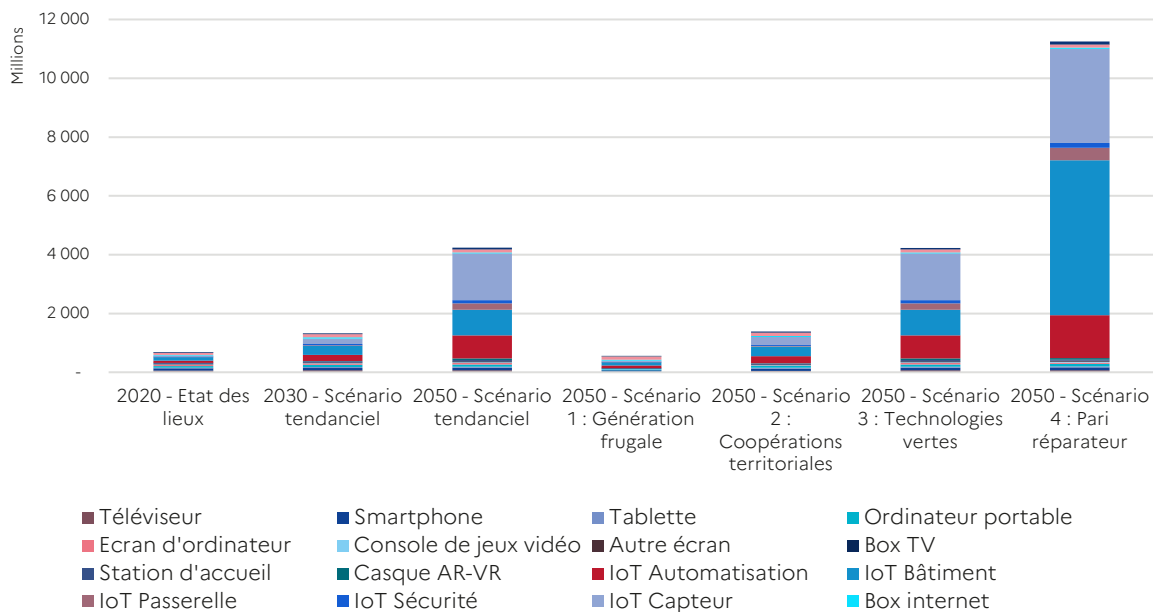


Figure 32 : Nombre total d'équipements en France pour l'état des lieux, le scénario tendanciel 2030 et cinq scénarios à 2050 (d'après ADEME-ADEME, 2022)

La Figure 33 présente le nombre total d'équipements pour l'état des lieux, le scénario tendanciel 2030 et cinq scénarios à 2050 pour quinze équipements, c'est-à-dire **sans tenir compte des cinq catégories d'objets connectés IoT**.

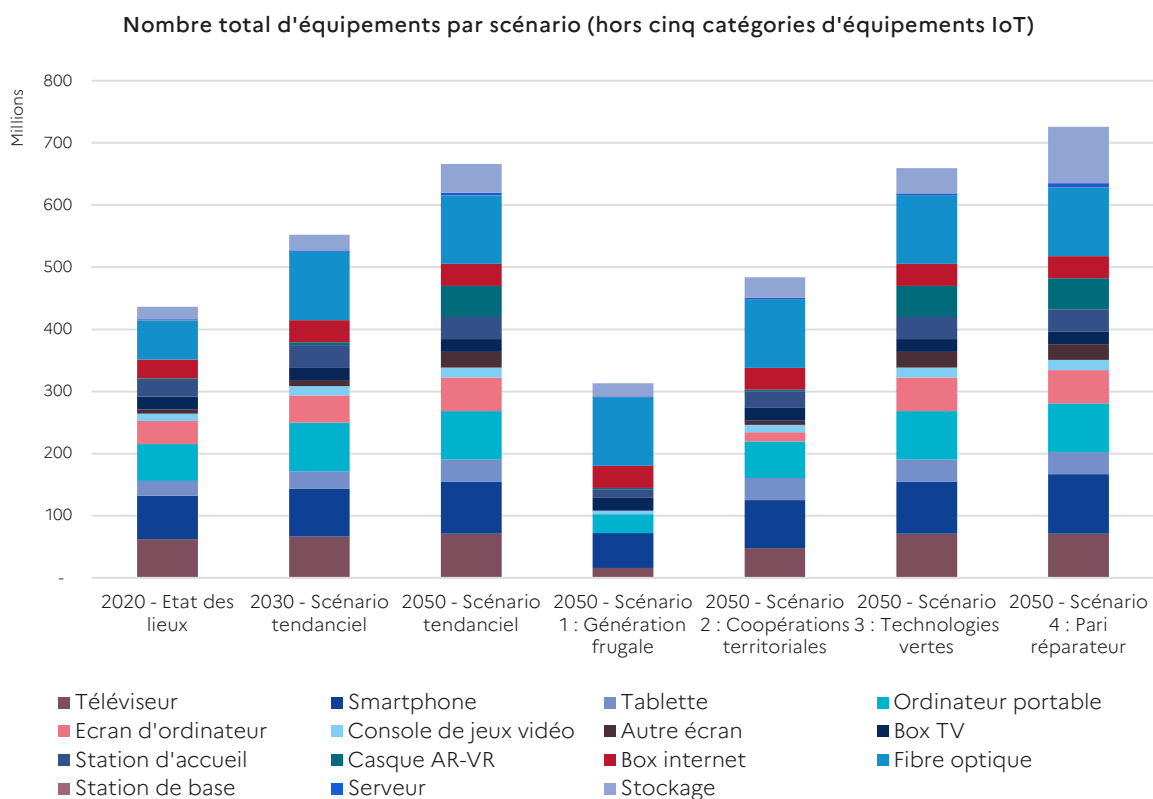


Figure 33 : Nombre total d'équipements pour l'état des lieux, le scénario tendanciel 2030 et cinq scénarios à 2050 hors IoT (d'après ADEME-ADEME, 2022)

La Figure 34 et la Figure 35 présentent le nombre de chaque type d'équipements en 2050 et les **taux de croissance du nombre d'équipements**⁷² d'ici 2050 pour tous équipements pour le scénario tendanciel. La première figure montre l'évolution de tous types d'équipements alors que la seconde n'inclut pas les objets connectés IoT et les casques AR-VR.



Figure 34 : Taux de croissance du nombre d'équipements d'ici 2050 pour tous les équipements pour le scénario tendanciel (Deloitte d'après ADEME-Arcep, 2022)

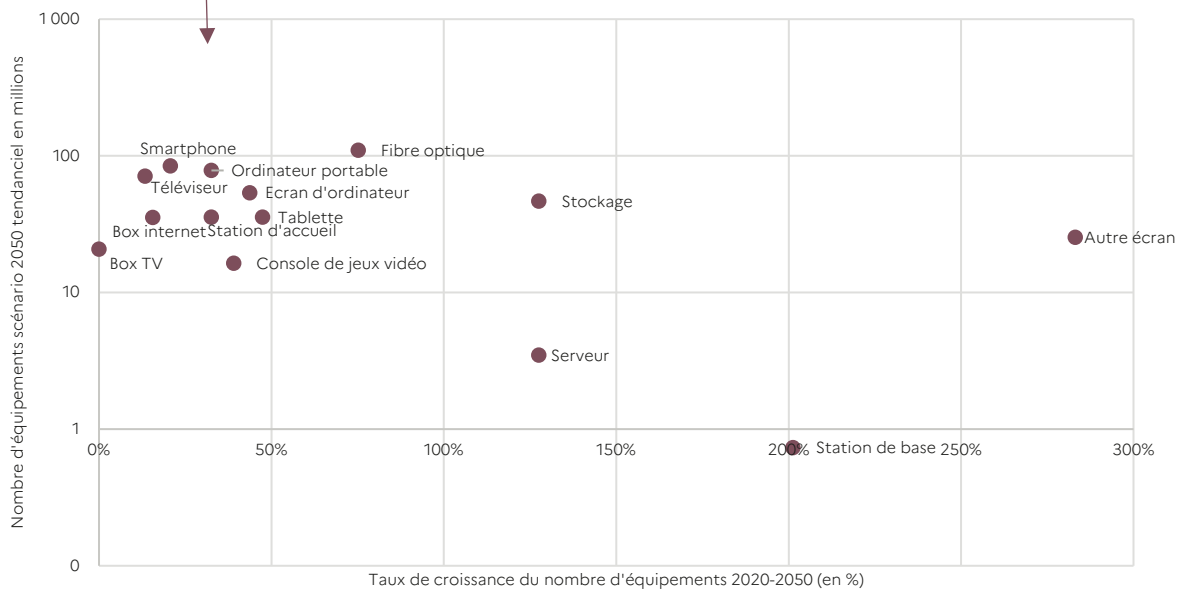


Figure 35 : Taux de croissance du nombre d'équipements d'ici 2050 hors équipements IoT et casques AR-VR pour le scénario tendanciel (Deloitte d'après ADEME-Arcep, 2022)

5.1.2.2. Résultats de l'analyse prospective – Quantités de métaux utilisés

A noter :

- Les résultats de cette partie sont tributaires de la **disponibilité des données** de composition métallique par équipement. Un récapitulatif des données disponibles par équipement est disponible en Annexe 7.5.1 ;
- **Les résultats ci-dessous ne prennent pas en compte les phénomènes de substitution.** En effet, **les résultats hors substitution sont les plus fiables** puisque les niveaux de substitution des différentes variables (diminution des consommations d'or et d'aluminium, hausse de la part de SSD) relèvent d'hypothèses. Des résultats complémentaires intégrant les impacts des niveaux faibles, modérés et élevés de substitution sont présentés en Annexe 7.5.2.

La Figure 36 présente en ordonnées la masse de chaque métal dans le parc actuel de 20 équipements numériques en France et en abscisses le **taux de croissance des besoins en chaque métal entre 2020 et 2050**. Il s'agit d'un **scénario tendanciel** hors substitutions. La Figure 37 présente les mêmes données hors gallium et hors yttrium.

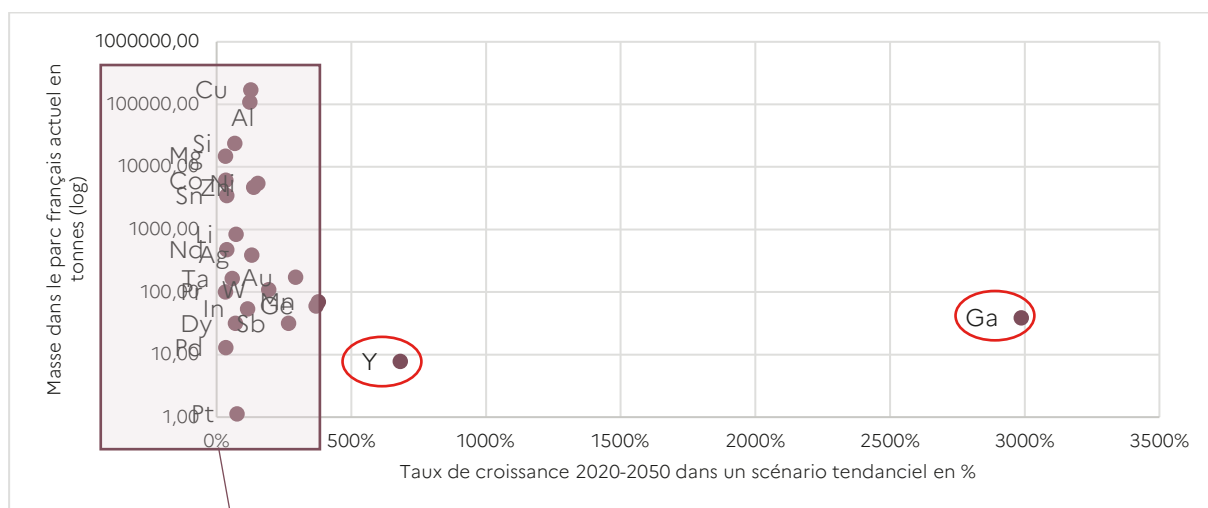


Figure 36 : Taux de croissance de la masse des métaux d'ici 2050 (scénario tendanciel, hors substitutions) – Tous métaux

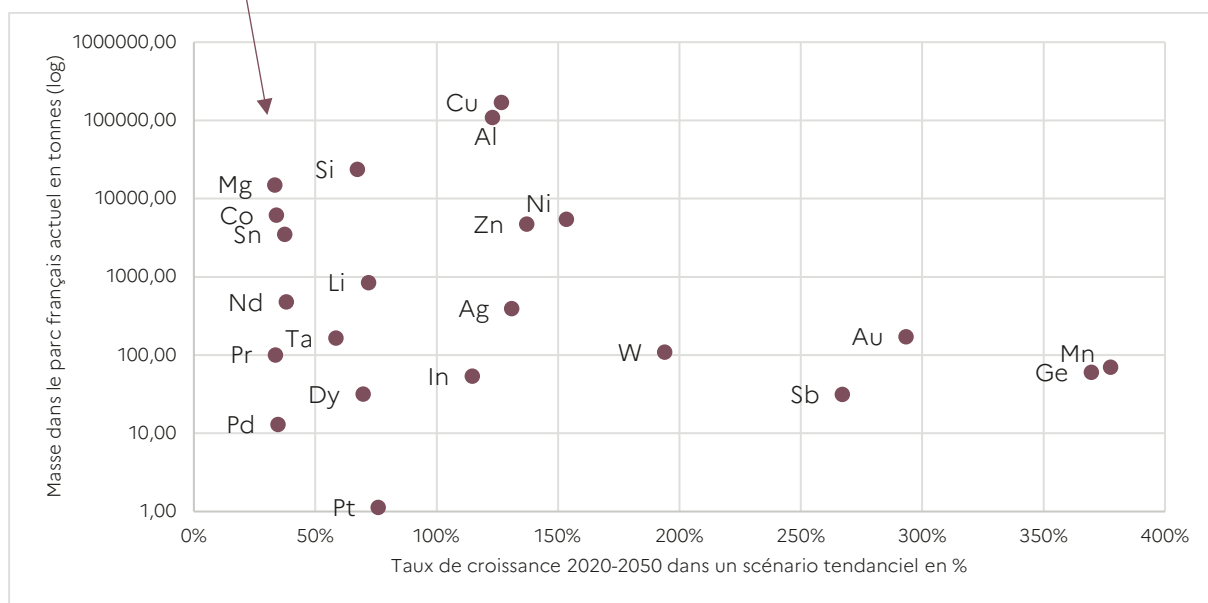


Figure 37 : Taux de croissance de la masse des métaux d'ici 2050 (scénario tendanciel, hors substitutions) – Hors gallium et yttrium

Le Tableau 38 présente les **coefficients multiplicateurs de la masse du métal dans le parc français par rapport à 2020** hors substitutions pour 2030 et 2050 (scénario tendanciel et quatre scénarios ADEME Transition(s) 2050). Plus une case est colorée en rouge, plus le coefficient multiplicateur par rapport à 2020 est élevé.

Exemple de lecture : « En 2050, hors substitutions, dans le cadre du scénario « Technologies vertes », les besoins en nickel dans le secteur du numérique seraient multipliés par 2,5 par rapport à ceux de 2020 ».

Tableau 38 : Coefficients multiplicateurs de la masse de 24 métaux dans 20 équipements dans le parc français en 2030 et 2050 par rapport à 2020 (hors substitutions)

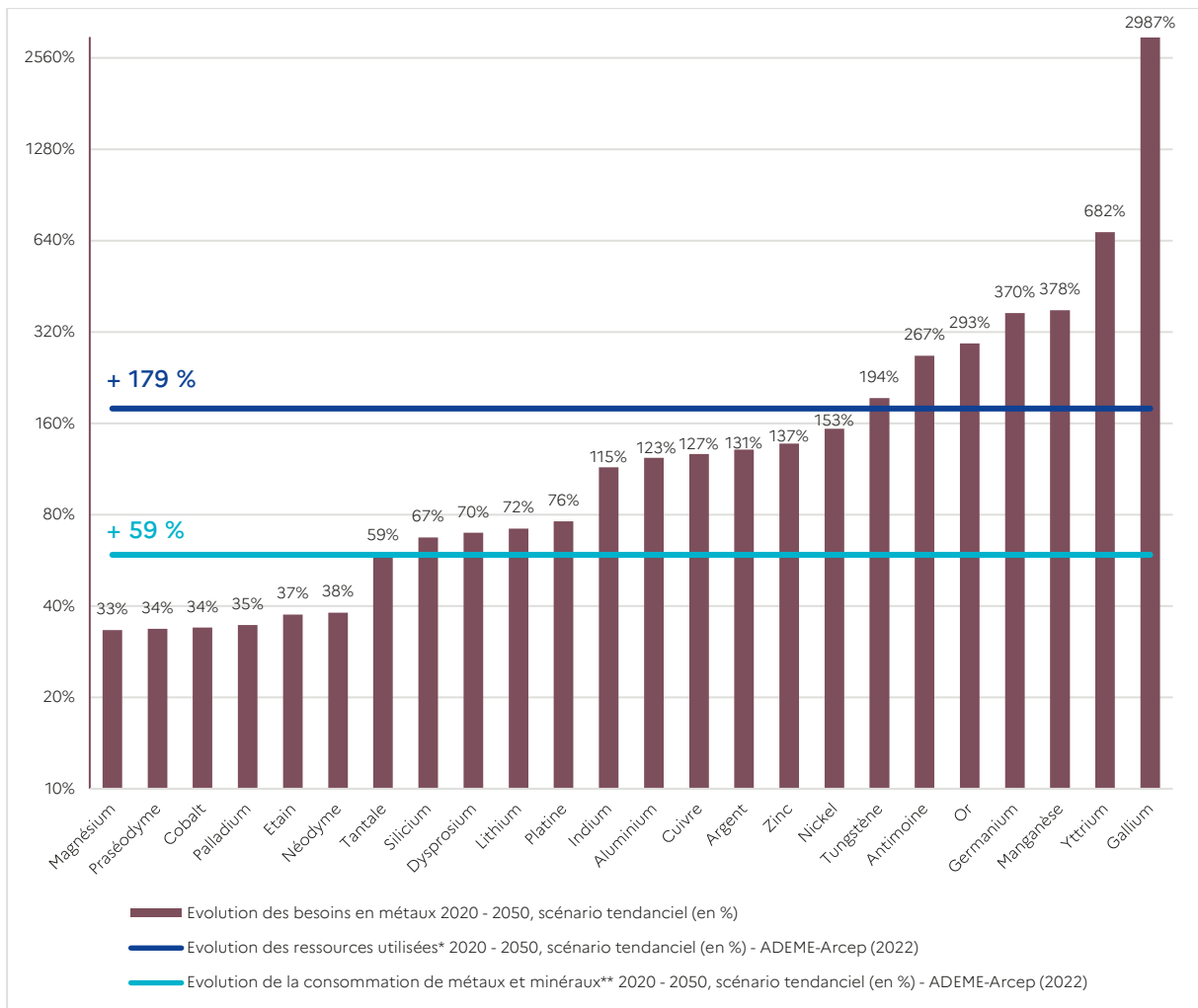
	Al	Sb	Ag	Co	Cu	Dy	Sn	Ga	Ge	In	Li	Mg	Mn	Nd	Ni	Au	Pd	Pt	Pr	Si	Ta	W	Y	Zn
2030 - Scénario tendanciel	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,3	1,7	1,3	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3	1,6	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,1	1,3	1,2
2050 - Scénario tendanciel <i>Sans substitutions</i>	2,2	3,7	2,3	1,3	2,3	1,7	1,4	30,9	4,7	2,1	1,7	1,3	4,8	1,4	2,5	3,9	1,3	1,8	1,3	1,7	1,6	2,9	7,8	2,4
2050 - Scénario 1 : Génération frugale <i>Sans substitutions</i>	0,5	1,0	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4	0,5	1,7	0,3	0,5	0,5	1,3	0,5	0,4	0,5	0,4	0,8	0,4	0,3	0,5	0,9	1,2	0,6
2050 - Scénario 2 : Coopérations territoriales <i>Sans substitutions</i>	1,1	1,6	1,1	1,0	1,2	1,3	0,8	5,2	2,2	1,0	1,1	1,0	2,4	1,0	0,9	1,4	0,8	1,3	1,0	0,7	1,0	1,8	3,1	1,1
2050 - Scénario 3 : Technologies vertes <i>Sans substitutions</i>	2,0	3,4	2,3	1,3	2,2	1,6	1,4	13,3	2,9	2,1	1,7	1,3	4,8	1,3	2,5	3,9	1,3	1,6	1,3	1,7	1,6	2,9	7,8	2,2
2050 - Scénario 4 : Pari réparateur <i>Sans substitutions</i>	4,6	5,5	5,5	1,4	3,9	2,5	1,4	46,5	6,1	5,1	1,7	1,3	5,1	1,7	2,9	11,7	1,5	2,8	1,6	1,7	1,6	3,2	11,0	3,4

La Figure 38 présente :

- Dans un histogramme, les taux de croissance (%) de la masse des métaux 2020-2050 calculés dans le cadre du scénario tendanciel hors substitutions de la présente étude pour 24 métaux (donnée non disponible pour le ruthénium) ;
- Avec deux lignes, les taux de croissance (%) de deux indicateurs calculés dans le cadre de l'étude ADEME-Arcep (2022) : « Ressources utilisées » et « Consommation de métaux et minéraux ».

Cette figure montre que près de la moitié des métaux – 11 métaux sur 24 – sont compris entre les deux indicateurs de l'ADEME-Arcep (2022). En effet, **la hausse de la consommation de métaux très fortement liée à la hausse du nombre d'équipements**, comme le détaillent les enseignements de la partie suivante. Quelques contre-exemples sont à noter :

- Six métaux ont des évolutions de consommation plus faibles que les deux indicateurs ADEME-Arcep (2022) sélectionnés. Cela s'explique en partie par leur utilisation dans des équipements dont le parc augmentera faiblement d'ici à 2050 (ex. téléviseurs) ;
- Sept métaux ont des évolutions de consommation supérieures, voire nettement supérieures, à celles des deux indicateurs. Cela s'explique notamment par une utilisation croissante dans les stations de base 5G millimétrique. Des analyses complémentaires pour les cinq métaux dont la croissance estimée est la plus élevée sont disponibles en section 5.1.3.3.



*Ressources utilisées : Utilisation de la définition MIPS prenant en compte les matériaux utilisés, la biomasse, les déplacements de terre mécanique ou par érosion, l'eau et l'air. L'indicateur MIPS donne une idée de l'effort effectué pour produire les biens et services.

**Consommation de métaux et minéraux : « Quantité de ressources minérales extraites de la nature en équivalent antimoine [...] C'est un standard des analyses de cycle de vie qui permet de mesurer l'épuisement des ressources naturelles » (ADEME-Arcep, 2022).

Figure 38 : Comparaison entre les taux de croissance de la masse des métaux 2020-2050 (scénario tendanciel, hors substitutions) avec l'évolution de deux indicateurs de l'étude ADEME-Arcep (2022) – échelle logarithmique

5.1.3. Principaux enseignements de l'analyse prospective

5.1.3.1. Enseignements sur le nombre et les types d'équipements en 2030 et en 2050

Analyse globale

Le nombre d'équipements numériques devrait augmenter de 522 % entre 2020 et 2050 dans un scénario tendanciel (+ 53 % hors équipements IoT). Deux tendances majeures causent l'augmentation du nombre d'équipements :

- **Le développement des appareils connectés (IoT) :** + 1 360 % entre 2020 et 2050 dans le cadre d'un scénario tendanciel. L'étude ADEME-Arcep (2022) a estimé le nombre d'objets connectés en UE à partir des données mondiales en 2020 fournies par le rapport de l'Agence Internationale de l'Energie (2019). Pour la France, une extrapolation a été établie, basée sur le nombre d'habitants (considérant un taux d'équipement identique sur tout le territoire européen) ;
- **Les mondes virtuels** (casques AR-VR), + 1 899 % entre 2020 et 2050 dans le cadre d'un scénario tendanciel*.

**Cette évaluation de l'étude ADEME-Arcep (2022) pourrait surestimer l'impact des mondes virtuels. En effet, la croissance du marché serait actuellement plutôt faible, notamment pour les principaux acteurs de place, tel que Meta, qui n'y trouvent pas encore un retour sur investissement satisfaisant (remarque du COPIL).*

C'est dans le scénario 4 « Pari réparateur » que le nombre d'équipements total augmente le plus (+ 1 552 % au global, + 4 203 % pour le volet IoT). En effet, ce scénario est caractérisé par :

- La numérisation extrême de l'économie ;
- La fréquence élevée de remplacement des équipements ;
- La multiplication des équipements pour les ménages, entreprises, et services publics.

Analyse par Tier

Concernant les terminaux : Comme évoqué ci-dessus, le taux de croissance est nettement plus élevé pour l'IoT et les casques AR/VR. Les équipements IoT voient une croissance très importante d'ici 2050 (+ 8 443 % pour les passerelles dans un scénario tendanciel). En effet, l'IoT est considéré comme l'un des sous-secteurs qui permet de maintenir une croissance dans le secteur des équipements du numérique (Mavana et Bol, 2023).

Concernant les réseaux : Le nombre d'équipements liés au réseau augmentera entre 16 % et 200 % :

- Pour le **réseau fixe**, le nombre de box internet devrait faiblement augmenter dans le cadre d'un scénario tendanciel (+ 16 % entre 2020 et 2050), en lien notamment avec l'allongement de leur durée de vie, la baisse du taux d'équipement et la poursuite du modèle de *leasing*, d'où la plus faible augmentation parmi les équipements du Tier réseaux ;
- Pour le **réseau agrégation** (fibre optique pour l'agrégation et cœur et, dans une moindre mesure, raccordement pour le réseau fixe), le déploiement de la fibre optique prendrait fin en 2030, soit un taux de croissance 2020-2050 de + 75 %. Après cette date, il s'agirait uniquement de renouvellements des câbles usagés, avec un taux de renouvellement de 3 % (calculé à partir d'une « durée de vie pratique » de 35 ans) ;
- Pour le **réseau d'accès**, d'ici 2050, les stations de base 2G-4G seront remplacées par des stations de base 5G, puis par des stations de base 5G millimétrique (ou potentiellement 6G), ce qui explique le taux de croissance élevé de 200 %.

Remarques importantes sur l'analyse prospective pour le Tiers Réseau :

- Déploiement de la 5G millimétrique : Comme évoqué plus haut, à date, l'émergence de la 5G millimétrique est peu observée par les acteurs des télécommunications, qui y voient des investissements très importants et un faible retour sur investissement. Ces acteurs estiment que, compte tenu de leur niveau actuel de connaissances et des retours d'expérience des expérimentations réalisées ou en cours, les **obstacles majeurs au déploiement de cette bande à court et moyen termes** incluent des problèmes techniques, la difficulté à identifier des cas d'usage avec un modèle d'affaires pertinent, ainsi qu'un écosystème de terminaux encore immature (remarque du COPIL).
- Evolution du nombre de stations de base d'ici à 2050 : L'étude ADEME-Arcep (2022) pourrait avoir **surestimé le nombre de stations de base en 2050**. En effet, cette évolution impliquerait des dizaines de milliers de stations de base à déployer pour chaque opérateur de télécommunications en France, et il n'est pas certain que ces acteurs soient en mesure de financer de tels investissements (remarque du COPIL)

Concernant les centres de données : Le taux de croissance du nombre d'équipements en data centers d'ici 2050 est de 128 %. L'évolution du nombre de serveurs et de dispositifs de stockage est estimée à partir du ratio superficie en m² IT / parc d'équipements en 2020 et des m² IT en 2030 – 2050. Néanmoins et d'après plusieurs membres du COPIL, le développement des data centers a été nettement plus élevé que ce qui avait été prévu par l'étude ADEME-Arcep (2022) au cours des 18 derniers mois. Un projet de loi prévoirait par ailleurs de faciliter l'installation des centres de données. Cette hypothèse pourrait donc être sous-estimée.

5.1.3.2. Enseignements généraux sur les quantités de métaux du parc d'équipements numériques d'ici à 2050

Enseignements pour le scénario tendanciel 2050 hors substitutions

Hors substitutions = Sans diminution des consommations d'or et d'aluminium et sans hausse de la part de SSD.

La Figure 36 indique que les consommations en France de **tous les métaux étudiés devraient augmenter d'ici à 2050** dans le scénario tendanciel hors substitutions.

La principale conclusion de l'analyse prospective « Métaux et numérique en 2050 » est donc la suivante : **la hausse de la consommation de métaux est bien plus liée à la hausse du nombre d'équipements qu'à tout autre tendance à 2050.**

Cette analyse s'applique par exemple à l'or (+ 293 % entre 2020 et 2050) dont la consommation augmenterait dans les 17 équipements dans lesquels une concentration a pu être évaluée : de + 0 % pour les box TV jusqu'à + 8 443 % pour les objets connectés IoT « passerelle »⁷³.

Les projections des besoins en métaux d'ici à 2050 dans un scénario tendanciel (cf. Tableau 38) ont permis d'identifier **cinq métaux prioritaires, connaissant les plus fortes hausses d'utilisation par le secteur numérique d'ici à 2050 : le gallium, l'yttrium, le manganèse, le germanium et l'or.** Des enseignements supplémentaires sont disponibles pour ces métaux en section 5.1.3.3.

⁷³ Les passerelles facilitent la communication entre les dispositifs IoT et les systèmes plus vastes. Elles sont de deux types : d'une part, les passerelles de réseau dédiées à la connectivité des capteurs et des contrôles du secteur commercial et industriel et, d'autre part, les passerelles de réseau résidentiel permettant l'accès aux réseaux Wi-Fi et filaires pour les capteurs et les contrôles (cf. Fiche équipement « Objet connecté Passerelle »).

Enseignements pour les quatre scénarios ADEME 2050 hors substitutions

Hors substitutions = Sans diminution des consommations d'or et d'aluminium et sans hausse de la part de SSD.

D'une part, le **lien de causalité entre la hausse du nombre d'équipements numériques et la hausse des besoins en métaux du numérique** est avéré pour le scénario tendanciel 2050 et les quatre scénarios ADEME 2050. Par exemple, l'explosion de la consommation d'objets connectés IoT dans le scénario 4 « Pari réparateur » se répercute dans les consommations des huit métaux pour lesquels une composition métallique par objet a été évaluée : aluminium, argent, cuivre, gallium, indium, nickel, or, yttrium (cf. Tableau 38).

D'autre part, les **changements de technologies au sein d'un même équipement expliquent des hausses importantes de la consommation de certains métaux** comme le **gallium** et **l'yttrium**. En particulier, la répartition entre les technologies de stations de base selon les scénarios diffère beaucoup selon les scénarios : alors que le scénario 1 « Génération frugale » consiste en un faible nombre de stations de base 4G et 5G, le scénario 4 « Pari réparateur » requiert 16 fois plus d'équipements, qui seraient à 78 % des stations de base 5G millimétrique et XG (6G et +) (ADEME-Arcep, 2022), dont les consommations unitaires de gallium et d'yttrium sont nettement plus élevées⁷⁴.

Enseignements pour les scénarios à 2050 en tenant compte des phénomènes de substitutions

Certaines **tendances de substitution** pourraient modifier les taux de croissance de la masse des métaux :

- La consommation d'aluminium devrait être optimisée ou remplacée par une consommation de matériaux composites pour les usages de l'aluminium autres que la dissipation thermique (remarque du COPIL) ;
- La consommation d'or devrait décroître, notamment pour des raisons économiques (substitution par du Cu/Pd) ;
- Le remplacement progressif d'une part des dispositifs de stockage HDD par des SSD.

Parmi les métaux qui seraient le plus affectés par les variables #1, #2 et #3 d'ici à 2050, on trouve l'aluminium, les terres rares (dysprosium, néodyme, praséodyme) et les métaux précieux (or, palladium, platine).

5.1.3.3. Principaux enseignements sur les métaux connaissant les plus fortes hausses d'utilisation par le secteur numérique d'ici à 2050

Les projections des besoins en métaux d'ici à 2050 dans un scénario tendanciel ont permis d'identifier **cinq métaux prioritaires**, connaissant les plus fortes hausses d'utilisation par le secteur numérique d'ici à 2050 : **le gallium, l'yttrium, le manganèse, le germanium et l'or**.

Cette section présente, pour chaque métal les principaux usages à 2050, les risques de tensions d'approvisionnement pour le métal, la possibilité de structurer une partie des approvisionnements à partir du recyclage (actuelles et futures) et des pistes de réflexion pour sécuriser les approvisionnements du métal pour le secteur du numérique en 2050.

Les données « Evolution globale du besoin en métal X du numérique » et « Evolution du besoin en métal X par équipement (scénario tendanciel) » ont été calculées dans le cadre de cette étude.

⁷⁴ En 2020, les stations de base représentent 0 % des besoins en yttrium et 1 % des besoins en gallium pour l'ensemble des équipements du numériques de l'étude dont des données de composition métalliques étaient disponibles. En 2050, dans un scénario tendanciel – qui intègre 71 % de stations de base 5G millimétrique et 6G (ADEME-Arcep, 2022) –, elles représenteraient 72 % des besoins en yttrium et 93 % des besoins en gallium pour les vingt équipements étudiés.

A noter : Les « cinq métaux prioritaires » voient leurs consommations augmenter en lien avec le Tier Réseaux (hormis l'or), en particulier dans les stations de base. Ces projections seraient à nuancer dans l'hypothèse où **le déploiement de la 5G millimétrique et le nombre de stations de base seraient moindre** par rapport aux scénarios retenus par l'étude ADEME Arcep (cf. remarque en section 5.1.3.1). Par souci de comparabilité, il a néanmoins été choisi de reprendre les mêmes hypothèses que celles de l'étude ADEME-Arcep (2022).

Afin de compléter l'analyse des plus fortes hausses d'utilisation par le secteur numérique d'ici à 2050, une **analyse croisée des taux de croissance et de la criticité des métaux** (réserves et disponibilité) est disponible en Annexe 7.5.3. D'après cette analyse complémentaire, parmi les cinq métaux ci-dessus, seul le germanium aurait une criticité élevée d'ici à 2050.

5.1.3.3.1. Evaluation des impacts et risques liés aux besoins en *gallium* en 2050

Métal prioritaire à 2050 #1: Gallium		
Evolution globale du besoin en gallium du numérique	Evolution du besoin en gallium par équipement (scénario tendanciel)	Principales fonctions et usages du gallium dans les équipements numériques
x 30,9 (ou + 2 987 %) entre 2020 et 2050 dans un scénario tendanciel hors substitutions.	Parmi les 37,5 tonnes de gallium supplémentaires en 2050 par rapport à 2020, 36,0 tonnes seraient utilisées dans les stations de base, soit 96,1 % de la demande additionnelle en gallium . Les treize autres équipements contenant du gallium ne représenteraient que 3,9 % de la demande additionnelle.	<p>L'industrie des semi-conducteurs, et plus particulièrement le secteur de la téléphonie mobile, est le plus gros consommateur de gallium. En 2015, 81 % du gallium utilisé dans le monde, était à destination des Technologies de l'information et de la communication (TIC) et du divertissement & média (Ericsson Research, 2018).</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'arséniure de gallium (GaAs) et le nitru de gallium (GaN) sont utilisés dans les circuits intégrés (SCRREEN, 2023)) et l'éclairage LED (écrans LCD et OLED) (BRGM, 2016a). <ul style="list-style-type: none"> • 70% de l'arséniure de gallium (GaAs) est consommé par le secteur des réseaux mobiles. Il est essentiellement utilisé dans les amplificateurs de puissance des stations de base et des mobiles (remarque du COPIL). • Selon un membre du COPIL, la hausse de l'utilisation de gallium est notamment liée à ses propriétés exceptionnelles en matière de rendement énergétique (GaAs pour les amplificateurs 4G, 5G des stations de base). En particulier, pour les stations de base, Zhang, Scola et Schulman (2023) estiment que la 5G nécessite que les amplificateurs de puissance passent de la technologie LDMOS à l'utilisation du nitru de gallium (GaN).

Criticité et risque d'approvisionnement du gallium d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche gallium):

Aujourd'hui, l'extraction minière de gallium est une situation de **quasi-monopole de la Chine** (98 % de la production) qui garde un rôle majeur dans les étapes de raffinage du métal. Pour le gallium, **le risque de rupture d'approvisionnement** (ex. limitation des exportations de gallium en août 2023 par la Chine) **est plus important que celui d'une hausse des prix**. En effet, la consommation totale de gallium pour les puces électroniques se chiffre en kg/an (lors du dopage d'un semi-conducteur, la quantité de gallium utilisée est généralement de l'ordre du microgramme ou du nanogramme); par conséquent, le prix du gallium est négligeable dans la fabrication des composants (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024).

Ainsi, d'ici à 2050 – et même d'ici les prochaines années –, **le gallium pourrait connaître des tensions d'approvisionnement importantes et qui pourraient compromettre le développement des stations de base 5G, 5G millimétrique et 6G** qui sont dépendantes de ce métal.

Possibilité de structurer une partie des approvisionnements à partir du recyclage d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche gallium):

Actuellement, **aucun acteur majeur dans le monde ne propose de solutions à l'échelle industrielle** pour permettre le recyclage du gallium (WeeeCycling, 2023 ; Sander and al., 2019).

D'ici à 2050, **la mise en place d'une filière de recyclage en boucle fermée permettrait de répondre à une partie de la demande en gallium**. En revanche, les obstacles à dépasser par les acteurs industriels sont multiples :

- Mettre en place des procédés de récupération du gallium de très haute pureté. Or, le niveau de pureté du gallium pour le secteur numérique est de 7N (99,99999 %) ou de 8N (99,999999 %). Ce niveau de pureté freine tout usage de gallium recyclé à date ;
- Parvenir à trouver un équilibre économique pour l'extraire ;
- Trouver des débouchés en France et en UE. Les fabricants des « circuits radio » sont majoritairement américains (ex. Qorvo, Analog Device, Broadcom), mais il y a des fournisseurs européens (ex. NXP, Infineon). Pour sécuriser les besoins en gallium au niveaux français et européens, cela impliquerait que les fabricants de station de base travaillent avec des fournisseurs d'amplificateur de puissance européens (remarques du COPIL)

Pistes de réflexion pour sécuriser les approvisionnements en gallium du secteur du numérique en 2050

- **Créer des stocks stratégiques** spécifiquement pour les métaux cruciaux à l'industrie numérique, dont le gallium (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024) ;
- **Construire des mines et des raffineries supplémentaires** pour sécuriser l'approvisionnement en métaux dans le secteur numérique. En ce qui concerne l'extraction minière, trois ou quatre pays fournisseurs différents seraient nécessaires selon un expert des besoins en métaux des Technologies, Médias et Télécommunications (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024) ;
- Maintenir les efforts pour améliorer le recyclage des déchets électroniques, notamment les métaux intégrés dans les composants électroniques ne peuvent pas actuellement être récupérés, comme le gallium (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024).

5.1.3.3.2. Evaluation des impacts et risques liés aux besoins en yttrium en 2050

Métal prioritaire à 2050 #2 : Yttrium		
Evolution globale du besoin en yttrium du numérique	Evolution du besoin en yttrium par équipement (scénario tendanciel)	Principales fonctions et usages de l'yttrium dans les équipements numériques
x 7,8 (ou + 682 %) entre 2020 et 2050 dans un scénario tendanciel hors substitutions.	Parmi les 6,8 tonnes d'yttrium supplémentaires en 2050 par rapport à 2020, 5,59 tonnes seraient utilisées dans les stations de base, soit 82,2 % de la demande additionnelle en yttrium (sur treize équipements numériques).	En 2015, 20 % des terres rares utilisées dans le monde, soit 32 000 tonnes, était à destination des secteurs des Technologies de l'information et de la communication (TIC) et du divertissement & média (Ericsson Research, 2018) : <ul style="list-style-type: none"> • Phosphores à base d'yttrium : écrans, LED et semi-conducteurs. • L'oxyde d'yttrium est adapté à la fabrication de « <i>superconductors</i> » pour les stations de base 5G mm et 6G, car ils excellent dans la conduction de l'électricité sans aucune perte d'énergie (Zhang, Scola et Schulman, 2023).

Criticité et risque d'approvisionnement de l'yttrium d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche yttrium) :

L'yttrium fait partie des terres rares. Or, aujourd'hui, l'extraction minière des terres rares est dominée par la Chine qui est responsable de 70 % de la production mondiale. La Chine est également leader dans la fabrication de matières transformées à partir de terres rares puisqu'elle produit 85 % des oxydes de terres rares et 90 % des alliages et des terres rares métalliques.

Ainsi, d'ici à 2050, **l'yttrium pourrait connaître des tensions d'approvisionnement importantes et qui pourraient compromettre le développement des stations de base.**

Possibilité de structurer une partie des approvisionnements à partir du recyclage d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche yttrium) :

Actuellement, aucune filière de récupération de l'yttrium en France et dans l'UE permettant le recyclage de l'yttrium issu d'équipements du secteur numérique n'a été identifiée.

Ainsi, d'ici à 2050, **la mise en place d'une filière de recyclage en boucle fermée permettrait de répondre à une partie de la demande en yttrium**, à condition de mettre en place des procédés de récupération de l'yttrium efficaces et rentables et de trouver des débouchés en France.

Pistes de réflexion pour sécuriser les approvisionnements en yttrium du secteur du numérique en 2050

- **Créer des stocks stratégiques** spécifiquement pour les métaux cruciaux à l'industrie numérique, dont l'yttrium (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024) ;
- **Construire des mines et des raffineries supplémentaires** pour sécuriser l'approvisionnement en métaux dans le secteur numérique. En ce qui concerne l'extraction minière, trois ou quatre pays fournisseurs différents seraient nécessaires selon un expert des besoins en métaux des Technologies, Médias et Télécommunications (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024) ;
- **Maintenir les efforts pour améliorer le recyclage des déchets électroniques** (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024), notamment pour les écrans, qui contiennent une faible part d'yttrium.

5.1.3.3. Evaluation des impacts et risques liés aux besoins en manganèse en 2050

Métal prioritaire à 2050 #3 : Manganèse		
Evolution globale du besoin en manganèse du numérique	Evolution du besoin en manganèse par équipement (scénario tendanciel)	Principales fonctions et usages du manganèse dans les équipements numériques
<p>x 4,8 (ou + 378 %) entre 2020 et 2050 dans un scénario tendanciel hors substitutions.</p>	<p>Parmi les 55,2 tonnes de manganèse supplémentaires en 2050 par rapport à 2020, 52,2 tonnes seraient utilisées dans les stations de base, soit 94,5 % de la demande additionnelle en manganèse*</p> <p><i>*Point d'attention : Evaluation du contenu métallique de deux équipements numériques uniquement (stations de base et smartphones).</i></p>	<p>En 2015, 0,4 % du manganèse utilisé dans le monde était à destination des secteurs des Technologies de l'information et de la communication (TIC) et du divertissement & média (Ericsson Research, 2018).</p> <p>Le manganèse, généralement sous forme de dioxyde et de sulfate de manganèse, est principalement utilisé comme cathode de cellule de batterie (International Manganese Institute, 2023). Ces batteries sont par exemple utilisées dans les smartphones.</p>

Criticité et risque d'approvisionnement du manganèse d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche manganèse):

Aujourd'hui, la production minière de manganèse est répartie entre trois principaux pays : l'Afrique du Sud (36% de la production mondiale), le Gabon (23%) et l'Australie (17%). Le rôle de la Chine prend de l'importance dans les étapes de transformation puisqu'elle domine la production de ferroalliages (60% de la production mondiale en tonnage) et du dioxyde de manganèse.

Ainsi, d'ici à 2050, **le risque de tension en approvisionnement en manganèse porterait davantage sur la phase de transformation**, dépendante de la Chine, que sur la production minière qui resterait diversifiée à l'échelle mondiale.

Possibilité de structurer une partie des approvisionnements à partir du recyclage d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche manganèse):

Actuellement, il n'existe pas de preuve que les acteurs identifiés traitant les batteries Li-ion issues des équipements du secteur numérique récupèrent le manganèse à échelle industrielle (Accurec, 2021). Par ailleurs, le manganèse contenu dans les piles salines et alcalines est aujourd'hui « mal » recyclé, car il se retrouve soit dans les scories de procédé Waelz (filière four Waelz), soit incorporé dans les ferronickels (filière pyrométallurgie) ou la fonte (filière pyrométallurgie fonderie) issus du traitement de ce type de piles (COREPILE, 2023).

Ainsi, d'ici à 2050, **la mise en place d'une filière de recyclage en boucle fermée (batteries) permettrait de répondre à une partie de la demande en manganèse**. A noter qu'il n'y a pas d'objectif de valorisation du manganèse à partir des déchets collectés de batteries dans le Règlement Batteries (cf. section 7.2.1.3)

Pistes de réflexion pour sécuriser les approvisionnements en manganèse du secteur du numérique en 2050

- **Construire des raffineries supplémentaires** pour sécuriser l'approvisionnement en manganèse dans le secteur numérique (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024). L'extraction minière du manganèse étant suffisamment diversifiée, l'enjeu se situe au niveau de la transformation (raffinage).
- **Maintenir les efforts pour améliorer le recyclage des déchets électroniques** (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024), notamment pour les batteries contenant du manganèse.

5.1.3.3.4. Evaluation des impacts et risques liés aux besoins en germanium en 2050

Métal prioritaire à 2050 #4 : Germanium		
Evolution globale du besoin en germanium du numérique	Evolution du besoin en germanium par équipement (scénario tendanciel)	Principales fonctions et usages du germanium dans les équipements numériques
x 4,7 (ou + 370 %) entre 2020 et 2050 dans un scénario tendanciel hors substitutions.	Parmi les 47,2 tonnes de germanium supplémentaires en 2050 par rapport à 2020, 37,5 tonnes seraient utilisées dans les stations de base et 9,4 dans la fibre optique , soit 79,5 % et 20,0 % de la demande additionnelle en germanium (sur quatre équipements).	En 2015, 80 % du germanium utilisé dans le monde, était à destination des Technologies de l'information et de la communication (TIC) et du divertissement & média (Ericsson Research, 2018). <ul style="list-style-type: none"> • Dioxyde de germanium : dopant dans les brins de fibre optique (SCRREEN 2023). • Germanium métallique : utilisé dans la composition de semi-conducteurs (SCRREEN 2023). Il est utilisé dans les amplificateurs de puissance des stations de base 5G mm et 6G (Zhang, Scola et Schulman, 2023).

Criticité et risque d'approvisionnement du germanium d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche germanium):

Aujourd'hui, la Chine domine le marché du germanium à toutes ses étapes de production et transformation. Elle est notamment à l'origine de 68 % de l'extraction minière du germanium et de 83 % de la production de matériaux transformés issus du germanium.

Ainsi, à court terme, selon un expert Technologies, Médias et Télécommunications, le germanium pose un défi très important, car il pourrait potentiellement être en tension dès 2025 et compromettre la finalisation du déploiement de la fibre optique. A long terme également, **le germanium pourrait connaître des tensions d'approvisionnement importantes, qui pourraient compromettre le développement des stations de base 5G, 5G millimétrique et 6G** qui sont dépendantes de ce métal.

Possibilité de structurer une partie des approvisionnements à partir du recyclage d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche germanium):

Actuellement, aucun acteur majeur en Europe ou ailleurs ne propose de solutions à l'échelle industrielle pour permettre le recyclage du germanium (WeeeCycling, 2023 ; Sander et al. 2019). Par ailleurs, il n'existe pas à date de solution industrielle pour recycler la fibre optique, cela s'explique en partie par la faible incitation économique au recyclage (SYCABEL, 2023).

Ainsi, d'ici à 2050, **la mise en place d'une filière de recyclage en boucle fermée permettrait de répondre à une partie de la demande en germanium**, à condition de mettre en place des procédés de récupération économiquement incitatifs (notamment pour la fibre optique).

Pistes de réflexion pour sécuriser les approvisionnements en germanium du secteur du numérique en 2050

- **Créer des stocks stratégiques** spécifiquement pour les métaux cruciaux à l'industrie numérique, dont le germanium (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024)
- **Construire des mines et des raffineries supplémentaires** pour sécuriser l'approvisionnement en métaux dans le secteur numérique. En ce qui concerne l'extraction minière, trois ou quatre pays fournisseurs différents seraient nécessaires (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024)
- **Maintenir les efforts pour améliorer le recyclage des déchets électroniques** (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024), notamment pour récupérer le germanium contenu dans les semi-conducteurs.

5.1.3.3.5. Evaluation des impacts et risques liés aux besoins en or en 2050

Métal prioritaire à 2050 #5 : Or		
Evolution globale du besoin en or du numérique	Evolution du besoin en or par équipement (scénario tendanciel)	Principales fonctions et usages de l'or dans les équipements numériques
x 3,9 (ou + 293 %) entre 2020 et 2050 dans un scénario tendanciel hors substitutions.	Parmi les 128,1 tonnes d'or supplémentaires en 2050 par rapport à 2020, 103,4 tonnes seraient utilisées dans les objets connectés IoT, soit 80,7 % de la demande additionnelle en or (sur seize équipements numériques).	En 2015, 6,4 % de l'or utilisé dans le monde était à destination des secteurs des Technologies de l'information et de la communication (TIC) et du divertissement & média (Ericsson Research, 2018): <ul style="list-style-type: none"> • Revêtements or-platine-palladium (Au-Pt-Pd) : utilisé dans la fabrication des téléphones, ordinateurs et tablettes (JRC, 2023). • Couche de finition nickel-or (Ni-Au) : utilisé dans la fabrication des téléphones, ordinateurs et tablettes (JRC, 2023) • Fils de liaison en or : utilisé dans la fabrication des téléphones, ordinateurs et tablettes (JRC, 2023)

Criticité et risque d'approvisionnement de l'or d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche or):

En 2017, 92 pays ont enregistré une production minière d'or (MinerallInfo, 2019). L'or est présent sur les 5 continents mais à des concentrations très faibles. Ainsi, d'ici à 2050, **l'or ne pourrait connaître des tensions d'approvisionnement que dans une moindre mesure pour le secteur numérique**. Par ailleurs, l'or de très haute qualité utilisé par le secteur numérique est particulièrement coûteux, ce qui a incité les fabricants de composants à **réduire son utilisation** (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024).

Possibilité de structurer une partie des approvisionnements à partir du recyclage d'ici à 2050 (cf. détail dans la fiche yttrium):

Actuellement, les acteurs de la fin de vie des équipements numériques s'accordent pour dire que **l'or fait partie des principaux métaux récupérés** à partir de DEEE du périmètre de l'étude, notamment à partir de cartes électroniques (Ecologic, 2023 ; ecosytem, 2023 ; TND, 2023).

D'ici à 2050, **l'or recyclé pourrait progressivement être réincorporé en boucle fermée**. A date, selon un expert de la récupération des métaux dans les DEEE, l'or des cartes électroniques est généralement réincorporé dans des applications différentes (ex. bijouterie) car la demande d'or recyclé du secteur numérique serait très faible, y compris lorsque les taux de pureté très élevés (Entretien avec un expert de la fin de vie des équipements numériques, 2023).

Pistes de réflexion pour sécuriser les approvisionnements en or du secteur du numérique en 2050

- **Poursuivre la baisse de la consommation d'or unitaire des équipements numériques**. Par ailleurs, une variable « Baisse de la concentration en or dans les équipements » a été intégrée à l'étude et est présentée en section 5.1.1.2.1.
- **Poursuivre les efforts pour améliorer la récupération de l'or dans les déchets électroniques** (Entretien avec un expert des technologies, médias et télécommunications, 2024). En particulier, maintenir les incitations économiques liées au recyclage des métaux précieux des cartes électroniques tandis que leur teneur en or est en réduction.

5.2. Résultats de l'atelier collaboratif avec les membres du Comité de Pilotage

5.2.1. Objectifs de l'atelier collaboratif « Métaux et numérique en 2050 »

Dans le cadre du quatrième COPIL de l'étude, un atelier collaboratif « Métaux et numérique en 2050 » a été organisé. Il a permis de **compléter la modélisation à 2050 grâce à des contributions qualitatives** d'experts de la chaîne de valeur des métaux.

Les objectifs de l'atelier étaient les suivants :

1. Imaginer rétrospectivement (les participants devaient se placer en 2050) l'impact des quatre scénarios de l'ADEME (cf. 5.1.1) sur la chaîne de valeur des métaux du périmètre de l'étude, notamment à partir des travaux déjà réalisés dans le cadre du Feuilleton « Transition(s) – Numérique » ;
2. Identifier les principaux risques et opportunités associés aux différentes étapes de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le numérique en 2050 ;
3. Envisager des pistes de leviers de maîtrise des principaux risques géo-économiques et socio-environnementaux identifiés.

L'équipe projet a utilisé l'outil collaboratif Klaxoon pour permettre la collecte et le partage des résultats et s'est inspirée des méthodes de design fiction pour faire réfléchir les participants, **sans tenir compte de la faisabilité des propositions (difficiles à évaluer du reste à horizon 2050)**, afin d'imaginer rétrospectivement les effets des quatre scénarios de l'ADEME sur les enjeux « Métaux et numérique ».

5.2.2. Implications des quatre scénarios Transition(s) 2050 sur les chaînes de valeurs des métaux du secteur du numérique

La première activité avait pour objectif d'imaginer rétrospectivement l'impact des quatre scénarios de l'ADEME sur la chaîne de valeur des métaux du périmètre de l'étude, à partir des trois composantes de l'économie circulaire établies par l'ADEME :

1. **Offre des acteurs économiques** : éco-conception, substitution technologique, approvisionnement, localisation des chaînes de valeur (mines et usines), etc. ;
2. **Demande et comportements des consommateurs** : allongement de la durée de vie des équipements, consommation responsable, etc. De nombreux éléments étant déjà disponibles dans le Feuilleton « Transition(s) – Numérique », ce volet a été peu développé.
3. **Recyclage et fin de vie optimale** : recyclabilité des équipements numériques, récupération des métaux, etc.

Les résultats de ces réflexions sont présentés de manière synthétique dans le Tableau 39. Les impacts peuvent être positifs ou négatifs et sont de toute nature : environnementale, technologique, économique, éducative, etc.

L'un des impacts majeurs serait l'amélioration importante de l'« économie circulaire Métaux et Numérique ». En effet, pour les quatre scénarios, les participants ont imaginé des **progrès majeurs en matière d'économie circulaire**, qu'il s'agisse de la collecte et du tri des DEEE, de la récupération des métaux qu'ils contiennent ou de leur réincorporation en boucle fermée dans le secteur numérique. Tout en concevant des besoins nouveaux et nécessitant des gisements non développés aujourd'hui (ex. *deep sea mining* pour les scénarios S3 et S4), le futur des métaux s'écrirait avec une économie circulaire très performante des équipements numériques.

Tableau 39 : Implications des scénarios Transition(s) 2050 sur les chaînes de valeurs des métaux du numérique

Scénario 1 – Génération frugale	
Offre des acteurs économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Développement très important de l'économie de la fonctionnalité (ex. location de terminaux, mutualisation obligatoire des équipements réseaux) pour réduire le nombre d'équipements et les quantités de métaux associées ; • Réduction au maximum du contenu en métaux des équipements (ex. low-tech) et miniaturisation des équipements ; • Stabilité des compositions des équipements et stabilité des alliages utilisés mais avec pour corolaire des freins à l'innovation) ; • Disparition progressive des expertises, savoir-faire et formations sur la métallurgie, notamment la métallurgie de pointe (exigences élevées du secteur du numérique) ; • Relocalisation de la fabrication de certains équipements en France et en Europe ; • A l'échelle mondiale, fermetures de mines et de premières étapes de transformation des métaux. Polarisation sur les étapes les plus rentables. Pas d'ouverture de mine en France.
Demande et comportements des consommateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Allongement de la durée de vie des objets et retardement du passage au statut de déchet des métaux contenus dans les équipements ; • Mise en place d'un « sac à dos écologique »⁷⁵ pour les produits numériques, qui réduit l'empreinte carbone et la consommation de métaux par habitant.
Recyclage et fin de vie optimale	<ul style="list-style-type: none"> • Interdiction de la fuite des déchets et amélioration très importante de la traçabilité des déchets métalliques, y compris ceux du secteur du numérique ; • Obligation d'intégrer un contenu recyclé minimal selon les propriétés techniques des matières recyclées ; • Généralisation et déploiement massif du reconditionnement pour tous les équipements du numérique ; • Perfectionnement des filières de recyclage sur fond de baisse tendancielle des gisements de métaux pour la filière du recyclage. Alors que, dans un premier temps, les volumes de matières premières de recyclage seraient supérieurs aux besoins du secteur du numérique (diminution du nombre d'équipements dans une vision frugale), ils pourraient dans un second temps devenir inférieurs aux besoins en métaux et donc nécessiter la (ré)ouverture de mines.
Scénario 2 – Coopérations territoriales	
Offre des acteurs économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Les critères du CRM Act sont respectés (ex. 25 % des métaux critiques utilisés sont issus du recyclage) ; • Développement très important de l'économie de la fonctionnalité : leasing d'équipements de télécommunications, mutualisation des réseaux et des terminaux ; • Relocalisation d'une grande partie des industries métallurgiques, notamment de la chaîne de valeur en amont de la production de <i>wafers</i>.
Demande et comportements des consommateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Massification des politiques visant à allonger la durée de vie des produits pour réduire l'empreinte matière (consommation de métaux) des équipements.
Recyclage et fin de vie optimale	<ul style="list-style-type: none"> • 100 % de collecte des équipements numériques, ce qui augmenterait le gisement de métaux à récupérer par la filière de fin de vie des DEEE ; • Critères de recyclage par métal dans les réglementations françaises et européennes ; • Développement d'une industrie de recyclage et de réemploi des composants électroniques « à taille humaine » et territorialisée. Les filières consommatrices des métaux recyclés sont localisées à proximité des entreprises de récupération des métaux.
Scénario 3 – Technologies vertes	
Offre des acteurs économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Hausse importante du nombre d'équipements, notamment l'IoT (industrie 4.0 : smart cities, smart home, smart buildings) et du besoin en stockage de données ; • Limitation de la consommation de métaux par équipement via l'éco-conception (nouveaux alliages moins intensifs en métaux, développement obligatoire des <i>hyperscalers</i>⁷⁶, etc.) ; • Relocalisation progressive des compétences métallurgiques en France/Europe : extraction de métaux, raffinage métallurgique à destination du numérique, formation initiale et continue, etc. ;

⁷⁵ La méthodologie du « sac à dos écologique » rapporte le poids du produit fini (en kg) au poids de matières premières (en kg) nécessaires à sa fabrication. Pour un smartphone, c'est 500 fois son poids (GreenIT, 2020).

⁷⁶ Un hyperscaler est un fournisseur de services cloud capable de proposer des services de calcul et de stockage à très grande échelle. Ces acteurs gèrent des hyperscales, c'est-à-dire des datacenters qui hébergent et exploitent plusieurs milliers de serveurs.

	<ul style="list-style-type: none"> • Exploration de nouveaux gisements de métaux pour répondre à la hausse de la demande de métaux du secteur du numérique : fonds marins, autres mines plus risquées et peu « acceptables » ; • Génération de tensions géopolitiques pour l’approvisionnement en métaux, à mitiger avec des partenariats stratégiques (accords bilatéraux et multilatéraux).
Demande et comportements des consommateurs	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Non traité.</i>
Recyclage et fin de vie optimale	<ul style="list-style-type: none"> • Relocalisation en Europe de la collecte, du tri et de la préparation des matières premières de recyclage (MPR). De nouveaux projets de tri des DEEE et de raffinage des métaux sont lancés en France ; • Taux de récupération des métaux de près de 100 % grâce aux innovations technologiques ; • Le nombre d’équipements n’étant pas stabilisé, les volumes de MPR métalliques disponibles ne répondent pas intégralement aux besoins du numérique pour la fabrication de nouveaux équipements.
Scénario 4 – Pari réparateur	
Offre des acteurs économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Importants progrès technologiques, permettant d’une part de limiter l’utilisation de métaux par équipement et d’autre part de trouver des « métaux de substitution » pour remplacer tous ceux qui sont en tension d’approvisionnement ; • L’exploration de nouvelles réserves minières se développe (ex. <i>deep sea mining</i>) pour répondre à la hausse importante de la demande en métaux critiques.
Demande et comportements des consommateurs	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Non traité.</i>
Recyclage et fin de vie optimale	<ul style="list-style-type: none"> • Perfectionnement des filières de gestion des DEEE en raison des volumes importants d’équipements en fin de vie, permettant une collecte et un traitement optimaux des DEEE ; • Le réemploi et le reconditionnement sont systématiquement priorisés par rapport au recyclage, qui intervient uniquement lorsque les deux premières modalités de traitement ne peuvent pas être assurées.

5.2.3. Principaux risques socio-environnementaux et géo-économiques à l’horizon 2050 pour les filières d’approvisionnement en métaux

La seconde activité avait pour objectif d’identifier les **principaux risques et opportunités** associés aux différentes étapes de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le numérique en 2050 et d’envisager des pistes de leviers de maîtrise des principaux risques identifiés. Les participants étaient libres de partager leurs analyses et n’avaient pour objectif d’atteindre un équilibre entre les différentes propositions ; l’objectif était uniquement d’**explorer les visions des chaînes de valeur des métaux** en 2050 dans les quatre scénarios (sans que ces visions soient réalistes).

Les résultats de ces réflexions sont présentés de manière synthétique dans le Tableau 40. **Les participants ont majoritairement imaginé des scénarios négatifs** et les opportunités sont finalement peu développées, même pour les S1 et S2. Du côté des risques, on retrouve, d’une part, des problèmes d’acceptabilité et de potentielles crises sociales et économiques pour les scénarios S1 et S2 et, d’autre part, un accroissement des impacts environnementaux et de la dépendance aux Etats non UE pour les scénarios S3 et S4.

Tableau 40 : Principaux risques et opportunités associés aux différentes étapes de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le numérique en 2050

	OPPORTUNITES	RISQUES [ET LEVIERS ASSOCIES]
Scénario 1 – Génération frugale		
D’un point de vue géo-économique	N/A.	<ul style="list-style-type: none"> • Frein à l’innovation pour le secteur du numérique et pour l’industrie métallurgique ; • Croissance nulle, voire négative pour les deux secteurs.

	OPPORTUNITES	RISQUES [ET LEVIERS ASSOCIES]
D'un point de vue socio-environnemental	<ul style="list-style-type: none"> Partage des équipements et valeurs sociales fortes autour de la frugalité ; Préservation de la biodiversité et limitation du réchauffement climatique liés à la diminution des besoins en métaux. 	<ul style="list-style-type: none"> Crise sociale liée à la faible acceptabilité des mesures et contraintes [levier : question du choix démocratique de ce modèle] ; Manque de suivi des actions ; Dumping environnemental à l'échelle mondiale, (volonté d'hégémonie de certains pays « non frugaux »).
Scénario 2 – Coopérations territoriales		
D'un point de vue géo-économique	N/A.	<ul style="list-style-type: none"> Epuisement de certains gisements pour le recyclage (mine urbaine) ; Complexification du recyclage : réduction des possibilités technologiques et hausse des coûts [levier : massifier les DEEE collectés en récupérant ceux d'autres pays] ; Guerre commerciale pour l'accès aux métaux (risques modéré).
D'un point de vue socio-environnemental	N/A.	<ul style="list-style-type: none"> Faible acceptabilité locale de certains projets territoriaux (mine, raffinage, recyclage) ; Faible acceptabilité globale de la mutualisation des équipements et de l'économie de fonctionnalité ; Changement des habitudes : par exemple, avec l'allongement de la durée de vie, la population n'a plus l'habitude de jeter ses équipements numériques dans les meilleurs exutoires disponibles [levier : mise en place de régulations et consignes pour atteindre 100 % de collecte].
Scénario 3 – Technologies vertes		
D'un point de vue géo-économique	<ul style="list-style-type: none"> Relocalisation d'activités en France en Europe, avec la possibilité de « sauts technologiques » ; Croissance économique positive et stable pour le secteur du numérique et les filières métallurgiques qui en dépendent, amélioration de la compétitivité ; Amélioration des expertises et formations sur les enjeux « Métaux et numérique ». 	<ul style="list-style-type: none"> Dépendance élevée vis-à-vis de pays miniers et hausse de la concurrence pour l'accès aux métaux [levier : apaisement d'éventuelles tensions géopolitiques grâce à des accords multilatéraux] ; Coût de plus en plus élevé des équipements numériques et des métaux qu'ils contiennent.
D'un point de vue socio-environnemental	N/A.	<ul style="list-style-type: none"> Contestations des nouveaux projets miniers ; Tensions entre deux modèles de société.
Scénario 4 – Pari réparateur		
D'un point de vue géo-économique	N/A.	<ul style="list-style-type: none"> Guerre commerciale pour l'accès aux métaux. Absence de technologie de substitution pour certains alliages, conduisant à des tensions d'approvisionnement ; Conflits d'usage entre les deux transitions numérique et énergétique.
D'un point de vue socio-environnemental	N/A.	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la production du numérique dans des conditions sociales et environnementales dégradées ; Stress hydrique empêchant d'extraire et de raffiner les matériaux nécessaires à la fabrication de composants électroniques.

6. Conclusion / Perspectives

L'évaluation de la consommation en métaux des équipements numériques est rendue difficile par le **peu d'information disponible sur leur composition**. Cette opacité se retrouve également s'agissant des **chaînes de valeur** : tant en amont, de la mine à l'équipement, qu'en aval, après la fin de vie de ces équipements, la chaîne de valeur des métaux comporte de nombreuses zones d'ombre qu'une recherche approfondie ne permet qu'en partie d'éclairer.

Les données accessibles permettent cependant de constater une **forte concentration de l'extraction de métaux** : la Chine se trouve en effet en quasi-monopole pour l'extraction de dix métaux du périmètre d'étude. Les métaux utilisés dans les équipements numériques nécessitent par ailleurs un niveau très élevé de pureté. Ces **opérations, dites d'affinage, sont réalisées par un nombre limité d'acteurs** en aval de l'extraction. Enfin, la production des équipements eux-mêmes est le plus souvent réalisée en Asie de l'Est.

En aval de la chaîne de valeur, le devenir des métaux, une fois collectés, est incertain : **pour la moitié d'entre eux, la présente étude montre qu'il n'existe pas de filière de recyclage à échelle industrielle** en France et dans l'UE, en particulier du fait de l'absence de demande justifiant l'opération de recyclage. Lorsqu'elles existent, en l'état actuel du marché et de la répartition des chaînes de valeur dans le monde, il n'existe pas de preuve que les métaux recyclés sont réincorporés dans de nouveaux équipements numériques.

L'évaluation de la criticité des métaux pour le secteur révèle que les acteurs économiques du secteur en France ont encore un faible niveau de maturité sur la question. Un des éléments d'explication possibles est **l'absence d'impact significatif du prix des métaux sur la production d'équipements**, les fabricants étant soit en capacité d'absorber les hausses de prix, soit non exposés à des restrictions d'approvisionnement. Une **approche plus holistique de la criticité** est donc nécessaire :

- L'extraction des métaux est associée à des **enjeux socio-environnementaux majeurs** ;
- La prise en compte des **étapes de la chaîne de valeur en aval de l'extraction** est indispensable, notamment la transformation des métaux, du fait du caractère stratégique de ces activités pour la production de composants numériques, et les enjeux environnementaux associés ;
- La localisation des chaînes de valeur est un **enjeu géostratégique**, s'agissant de la fabrication d'équipements dont l'utilisation est devenue indispensable au quotidien ;

L'évaluation de la criticité des métaux pourrait ainsi faire ressortir d'éventuels **conflits d'usage liés à la double transition** énergétique et numérique à moyen et long terme, puisque les deux transitions vont demander des métaux identiques, tel que le cuivre.

Enfin, l'étude montre qu'il **existe une forte dépendance de la consommation de métaux dans les équipements numériques au volume projeté de ces équipements**. L'étude ne permet pas en effet de conclure que les réductions unitaires de consommation de métaux (réduction de l'usage et/ou substitution de certains métaux) permettront de compenser la hausse induite par l'augmentation du nombre d'équipements en France. Par conséquent, les choix technologiques et sociétaux effectués aujourd'hui pour notre environnement numérique (ex. déploiement de l'internet des objets – IoT – ou de la 5G, 5G millimétrique et 6G) détermineront la consommation future de métaux par les équipements numériques.

Les résultats de l'étude permettent d'établir les recommandations suivantes, à destination des acteurs économiques fabricant et utilisant des équipements d'une part, et des pouvoirs publics d'autre part :

1. **Rendre les chaînes de valeur plus transparentes** afin de répondre aux questions suivantes : quels sont les acteurs économiques qui participent à cette chaîne de valeur ? Quels sont les impacts socio-environnementaux associés aux différentes étapes de fabrication ?
2. **Mettre en place une stratégie de souveraineté**, en tenant compte des possibilités limitées de relocalisation à court et moyen-terme de tout ou partie des chaînes de valeur, liées à des investissements conséquents et à des savoir-faire acquis et entretenus depuis longtemps là où les équipements et leurs composants sont produits ;

3. **Amorcer une réflexion sur la mise en place de bonnes pratiques de sobriété** – à la fois sur les usages et sur la conception des équipements – **et de circularité** des métaux utilisés par le secteur.

Ces recommandations sont alignées avec les objectifs du « Critical Raw Materials Act » en 2024, qui dresse deux listes de matières premières (34 critiques et 17 stratégiques) essentielles pour les transitions écologique et numérique et qui fixe **trois niveaux de référence pour la consommation annuelle de matières premières** de l'UE : 10 % provenant de l'extraction locale, 40 % de transformation dans l'Union et 25 % issues de matières recyclées. A ce titre, en octobre 2024, le Ministère de la Transition écologique a annoncé le lancement de travaux pour élaborer un **plan de circularité sur les matières premières critiques**, comprenant un groupe de travail sur les équipements électriques et électroniques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, 2019. Diagnostic et état des lieux de la filière de traitement mécanisé des DEEE en France.
- ADEME, 2020a. Équipements électriques et électroniques : données 2019 – Rapport annuel.
- ADEME, 2020b. Campagnes de caractérisation des éco-organismes. Données 2019.
- ADEME, 2021. Équipements électriques et électroniques : données 2020 – Rapport annuel.
- ADEME, 2021b. Fonds réemploi et réutilisation de la filière équipements électriques et électroniques.
- ADEME, 2022. Piles et Accumulateurs : données 2021 – Rapport annuel.
- ADEME/ARCEP, 2022. Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. Etude en trois rapports.
- ADEME, 2024. Transition(s) 2024. Feuilleton Numérique – Quels impacts environnementaux dans une France neutre en carbone en 2050 ? URL : <https://bibliothèque.ademe.fr/recherche-et-innovation/6270-prospective-transitions-2050-feuilleton-numerique.html>
- Agence Internationale de l'Energie, 2019. Total Energy Model for Connected Devices.
- AGIT, 2020. Baromètre des pratiques Green IT des entreprises en France 2020, en partenariat avec Ecologic, OpinionWay, ADEME
- AFNUM, 2024. Entretien réalisé avec l'Alliance Française des Industries du Numérique [réalisé le 3/04/2024]
- ARCEP, ARCOM, METI, ANCT, 2022. BAROMÈTRE DU NUMÉRIQUE-édition 2022. Enquête sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française.
- ARCEP, 2023. Les services de communications électroniques en France – 2^{ème} Trimestre 2023. Observatoire des marchés des communications électroniques
- AREP, 2023. POST. Aux (res)sources de l'urbain – revue AREP
- BEER Nicola, 2023. European critical raw materials act In "A Europe Fit for the Digital Age" <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-europe-fit-for-the-digital-age/file-european-critical-raw-material-act>
- Beuchle, R., Bourgoïn, C., Crepin, L., Achard, F., Migliavacca, M. and Vancutsem, C., Deforestation and forest degradation in the Amazon - Update for year 2022 and link to soy trade, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/211763, JRC134995.
- BGR, 2016. Supply and demand of lithium and gallium.

- Bizzo, W.A. et al., 2014. Characterization of Printed Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical Separation.
- Bookhagen, Bodo, Bastian D., Buchholz P., Faulstich M., Opper C., Irrgeher J., Prohaska T., Koeberl C., 2020. Metallic resources in smartphones.
- Bordage, Frederic (2019), Empreinte environnementale du numérique mondial, GreeIT
- BRGM, 2016a. Fiche de criticité – Gallium.
- BRGM, 2019. Ressources minérales et économie circulaire. URL : <https://www.brgm.fr/fr/actualite/video/ressources-minerales-quelle-place-vie-quotidienne-queelles-strategies>
- BRGM, 2022, WMF criticality assessment – BRGM, CRU, McKinsey. World Material Forum – 16-18 June 2022
- Carrara, S. et al., 2023a. Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, Joint Research Center (JRC), doi:10.2760/386650, JRC132889.
- CEDaCI., 2020. A situational analysis of a circular economy in the data center industry.
- CEPIR, 2024. Cas d'Étude pour un Immersif Responsable. Démarche prospective de CEPIR: la XR immersive à l'horizon 2030
- CEWASTE, 2021. A contribution to future Critical Raw Materials Recycling. CEWASTE Project Final Report.
- CGDD, 2023. Les ressources minérales critiques pour les énergies bas-carbone – chaînes de valeur, risques et politiques publiques, Rapport de synthèse.
- Code de l'environnement, N.A. articles R. 543-172 à R. 543-206. URL : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_l/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000028161350/
- COMES, 2018. Recommandations du Comité des Métaux Stratégiques pour le développement de compétences industrielles françaises dans le recyclage des métaux critiques.
- COMES, 2020. Avis du Comité pour les Métaux Stratégiques sur le recyclage des cartes électroniques.
- Commission Européenne, 2020. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474> [Consulté le 2023/08]
- Commission Européenne, 2023. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., Veeh, C., Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report, Publications Office of the European Union.
- Commission Européenne, 2023b. Commission consults citizens and stakeholders on the Directive on waste from electrical and electronic equipment (WEEE). URL: https://environment.ec.europa.eu/news/commission-consults-citizens-and-stakeholders-directive-waste-electrical-and-electronic-equipment-2023-06-16_en
- Commission européenne, 2024. Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en [consulté en 06/2024]

- Conseil de l'UE, 2024. Autonomie stratégique: le Conseil donne son approbation finale au règlement sur les matières premières critiques. Communiqué de presse du 18 mars 2024.
- Corepile, 2023. Entretien avec Frederic Hedouin et David Turmel [Réalisé le 26/07/2023]
- Danino-Perraud R., 2020. The recycling of lithium-ion batteries. A strategic Pillar for the European Battery Alliance. Etude pour l'Institut Français des Relations Internationales.
- Drapeau P., 2020. Les batteries pour la mobilité – Guide à l'usage des décideurs européens pour s'orienter dans le siècle des métaux, Deloitte.
- Ecologic, 2020. Enquête réalisée par l'institut de sondage CSA en mars 2020.
- Ecologic, 2023. Entretien avec Victor François [Réalisé le 25/07/2023]
- Ecologic, 2024. Audits de caractérisation. <https://www.ecologic-france.com/professionnels/activites-service-et-traitement/audit-technique-performance-recyclage-deee.html> [consulté en mars 2024]
- ecosystem, 2023. Entretien avec Alice Bizouard [Réalisé le 04/09/2023]
- ecosystem, 2023b. Référencement des acteurs du réemploi et de la réutilisation. <https://www.ecosystemfondsrr.eco/> [visité en 2023/11]
- Ericsson Research (2018), A high-level estimate of the material, EPiC Series in Computing
- Eurométaux, 2022. Metals for Clean Energy.
- Ferry L., Lopez-Cuesta J.-M., 2020. Retardateurs de flammes RF des matériaux polymères – réaction au feu et dégradation thermique des polymères, Techniques de l'Ingénieur
- France Stratégie, 2020. La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé, document de travail
- Goetz D., 2019. Notions d'économie du secteur minier – présentation pour le Comité pour les métaux stratégiques
- Gouvernement, 2022. Un bonus réparation pour les produits électriques et électroniques. Communiqué de presse du 16 novembre 2022.
- Graedel, T. and al., 2015. The Criticality of Metals and Metalloids.
- GreenIT, 2018. Etude WeGreenIT - Quelle démarche Green IT pour les grandes entreprises françaises. Etude pour WWF France
- GreenIT, 2020, Frédéric Bordage. 500 fois son poids en matière première
- Hatayama, Hiroki & Tahara, Kiyotaka, 2018. Adopting an objective approach to criticality assessment: Learning from the past, Resources Policy, Elsevier, vol. 55(C), pages 96-102.
- Hess, J.C., 2024. Chip Production's Ecological Footprint: Mapping Climate and Environmental Impact. Rapport Interface
- ICSG, 2023. The world copper factbook 2023, International Copper Study Group
- IGF, 2023. Searching for Critical Minerals: How metals are produced and associated together? – Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable development – Publié par l'International Institute for Sustainable Development
- International Tin Association, 2023. ITA Study – Macro pressure rolls back tin demand.
- ITU, 2011. Overview and general principles of methodologies for assessing the environmental impact of information and communication technologies, Series L, Construction, Installation and Protection of cables and other elements of outside plant

- Johnson, K.M., Hammarstrom, J.M., Zientek, M.L., and Dicken, C.L., 2014. Estimate of undiscovered copper resources of the world, 2013: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2014-3004, 3 p.
- Joint Research Center (JRC), 2018. Towards Recycling Indicators based on EU flows and Raw Materials System Analysis data.
- Joint Research Center (JRC), 2023b. ICT Task Force study: Final Report.
- JORC, 2012. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code) [online]. <http://www.jorc.org> (The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia)
- Lacoste Y., 2012. La géographie, la géopolitique et le raisonnement géographique, Hérodote, n°146-147.
- LeMagIT (2023), Guide Essentiel : Accélérateurs : les GPUs, DPUs et autres architectures serveur en 2023. URL : <https://www.lemagit.fr/definition/GPU-unite-de-traitement-graphique>
- Louvigné, P.-F., Etude de veille sur le marché du titane 2018-2020.
- Malmodin J., Bergmark P., Matinfar S., 2018. A high-level estimate of the material footprints of the ICT and E&M sector, ICT for Sustainability 2018. EPiC Series in Computing. Vol. 52, pp 168-186.
- Materion, 2024. Recovering Precious Metals - Unrecovered Output Increases Costs. URL: [Recovering Precious Metal Shield Kit Cleaning Value \(materion.com\)](https://www.materion.com/Recovering-Precious-Metal-Shield-Kit-Cleaning-Value)
- Magnetics, 2020. Permanent Magnet Market Will Rise to Nearly \$37 Billion by 2027. URL: <https://magneticsmag.com/permanent-magnet-market-will-rise-to-nearly-37-billion-by-2027/>
- Mineral Info, 2017. La mine en France. Développement, financement et construction. Tome 5
- Mineral Info, 2020. Le silicium : un élément chimique très abondant, un affinage stratégique – Ecomine. URL : <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique>
- Nassar N. T. et al., 2015. Y-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Sci. Adv.* 1, e1400180 (2015). DOI:10.1126/sciadv.1400180
- Nippon Micrometal, 2022. Next-generation bonding wires for the semiconductor industry
- OCAD3E, 2021. Étude gisement DEEE. Rapport de phase 2 – Modélisations et plan d'action (DEEE ménagers).
- OCAD3E, 2021b. Rapport de phase 3 – Modélisations et plan d'action pour DEEE professionnels.
- OCAD3E, 2021c. Etude gisement DEEE – synthèse et consolidation des résultats.
- OCDE, 2022. Compare your country, Trade in Raw Materials – 2022 Edition. <http://www.compareyourcountry.org/trade-in-raw-materials/en/0/ALL/all/default/2021>
- T. Pirson, T. P. Delhaye, A. G. Pip, G. Le Brun, J. -P. Raskin and D. Bol, "The Environmental Footprint of IC Production: Review, Analysis, and Lessons From Historical Trends," in *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 36, no. 1, pp. 56-67, Feb. 2023,
- Recommerce, 2023. Baromètre recommerce 2023 : le marché du mobile d'occasion.
- RECORD, 2023. Etude des risques environnementaux, socio-sociétaux et juridiques des approvisionnements en minerais stratégiques pour les transitions énergétique et numérique, 178p., n°22-0721/1A

- Reuter, M.A., Van Schaik A., 2018. Limits of the Circular Economy: Fairphone Modular Design Pushing the Limits
- Sander K., Marscheider-Weidemann F., Wilts H., Hobohm J., Hartfeil T., Schöps D., Heymann R. (2019), Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro).
- SCRREEN, 2023. Factsheets – CRMS 2023. <https://screen.eu/crms-2023/> [consulté en 05/2024]
- SYCABEL, 2023. Entretien avec Laurent Gasca [Réalisé le 18/12/2023].
- Tajima K., Kubota T., Jeong C.Y., 2022. Preparation of electrochromic thin films by humidity-controlled spin coating, Thin Solid Films, Volume 758, 139412, ISSN 0040-6090.
- Terra Nova Développement, 2024. Entretien réalisé en janvier 2024.
- Techniques de l'ingénieur, 2022. Stress hydrique : les datacenters et les usines de processeurs cherchent des alternatives. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/stress-hydrique-les-datacenters-et-les-usines-de-processeurs-cherchent-des-alternatives-114779/>
- The Cube Research, 2021. QLC Flash HAMRs HDD
- Thomas Christian, 2016. Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art. <https://www.annales.org/re/2016/re82/RE-82-Article-THOMAS.pdf>
- Thomas Christian, 2020. Le recyclage des cartes électroniques en France. Responsabilité & Environnement n°99 – Annales des Mines
- Toluna, 2023. Evaluation du nombre de téléphones portables usagés. Harris Interactive et Crédoc. Lot 1 : Les Ménages. Rapport final du 16/06/2023.
- Umicore, 2010. The Hoboken recycling plant.
- UNEP, 2013. Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.
- UNEPFI, 2014. Human Rights for the financial sector. Guidance tool – Mining and metals.
- US Department of Energy, 2022. Rare Earth Permanent Magnets Supply Chain Deep Dive Assessment
- van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hirschier, R.
- Varas A., Varadarajan R., Goodrich J., Yinung F., 2021. Strengthening the global semiconductor supply chain in an uncertain era, Rapport BCG pour SIA (Semiconductor Industry Association)
- Vernier Jacques, 2018. Les filières REP – rapport pour le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, et de l'Economie et des Finances.
- Vicoulon, 2024. RDC contre Apple : la production minière congolaise écoulee « illégalement » par le Rwanda ? Radio France International. URL : RDC contre Apple : la production minière congolaise écoulee « illégalement » par le Rwanda ?
- Weee Cycling (2023), entretien avec Serge Kimbel [Réalisé le 4/09/2023]
- WWF, 2023. Extracted forests-Unearthing the role of mining-related deforestation as a driver of global deforestation.
- Zhang, Z., Scola, L. et Schulman, A., 2023. Investigating the Sustainability of the 5G Base Station Overhaul in the United States.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

FIGURES

Figure 1 : Evolution du taux d'équipement (%) des répondants au baromètre du numérique 2023 de l'ARCEP (ARCEP, 2023).....	14
Figure 2 : Trafic de données consommées sur les réseaux mobiles en France depuis 2017 (ARCEP, 2023).....	15
Figure 3 : Composition d'un téléphone portable classique (Bookhagen, 2020).....	15
Figure 4 : Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par composants du numérique (à gauche) et répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par phase du cycle de vie (%) (ADEME ARCEP, 2022)	16
Figure 5 : Evolution du scénario tendanciel de 4 indicateurs de l'impact environnemental du numérique (sur tout le cycle de vie) (ADEME ARCEP, 2022) - * Définition MIPS prenant en compte les matériaux utilisés, la biomasse, les déplacements de terre mécaniques ou par érosion, l'eau et l'air.....	16
Figure 6 : Contribution cradle-to-gate d'un kg de métal aux émissions de GES (en CO2 eq.) et à l'émission de substances toxiques (en kg de 1,2 dichloroéthane équivalent), normalisé au Mn (=1) (UNEP, 2013).....	17
Figure 7 : Contribution de la production mondiale des métaux aux émissions de GES mondiales – normalisée à la production de Rh (=1) (UNEP, 2013).....	17
Figure 8 : Modélisation de la chaîne de valeur d'un minerai (RECORD, 2023)	19
Figure 9 : Représentation schématique des principaux déchets solides, liquides et gazeux associés aux processus d'exploitation et de traitement du minerai (SystExt, 2021).....	20
Figure 10 : Répartition des causes de rupture d'approvisionnement en part des événements analysés (en %). La figure présente également le nombre d'événements par catégorie d'évènement (en valeur absolue).....	23
Figure 11 : Résumé des enjeux liés à l'extraction des métaux.....	25
Figure 12 : Liste des 25 métaux considérés dans le périmètre de l'étude.....	28
Figure 13 : Tableau périodique de la « companionship* » à échelle mondiale pour 2008. Les métaux majoritairement hôtes apparaissent en bleu, et ceux extraits en tant que co-métaux en rouge (Nassar et al., 2015).....	32
Figure 14 : Roue de la « companionship » des métaux (Nassar et al., 2015).....	32
Figure 15 : Classification des métaux en fonction de leurs utilisations dans le domaine numérique.....	43
Figure 16 : Part du numérique dans les secteurs utilisateurs pour les métaux du périmètre de l'étude (Deloitte, d'après diverses données ; Malmodin et al., 2018).....	45
Figure 17 : Etapes de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le secteur numérique, adaptées du JRC (2023).....	47
Figure 18 : Production et réserves mondiales de cuivre en 2022 (ICSG, 2023).....	48
Figure 19 : Cartographie mondiale de l'extraction des métaux stratégiques pour le secteur numérique (Deloitte, d'après diverses sources)	51
Figure 20 : Score de criticité total sur 30 par métal.....	52
Figure 21 : Score de criticité par métal – Résultats totaux et par indicateur	53
Figure 22 : Apport d'électricité nécessaire par étape de production de Si EG en MWh/t (Mineral Info, 2020).....	54
Figure 23 : Evolution des tonnages de DEEE ménagers collectés, par flux entre 2006 et 2020 en France (ADEME, 2021).....	59
Figure 24 : Comparaison entre exutoires primaires du gisement et origines de la collecte (GEM+PAM+écrans) (kt) en France (OCAD3E, 2021).....	60
Figure 25 : EOL-RR en comparaison avec EOL-RIR pour des matériaux sélectionnés dans l'UE (JRC, 2018).....	68
Figure 26 : Contribution du recyclage à la satisfaction de la demande de l'UE en matières premières : EOL RIR. (JRC, 2023)	68
Figure 27 : Représentation schématique des procédés de récupération des métaux des cartes électroniques d'Umicore (Umicore, 2010).....	72
Figure 28 : Statut des appareils dans le parc de DEEE (CAT 02 et CAT 06) en 2019. Volume du parc estimé selon méthode MC+, statut d'utilisation selon enquêtes détenteurs Ipsos et CSA 2020 (OCAD3E, 2021)	77
Figure 29 : « Roue métallique » de van Schaik et Reuter (2018)	82
Figure 30 : Relation entre la concentration moyenne par équipement de chaque métal, et le prix du métal en 2020 (Deloitte, d'après diverses données)	85
Figure 31 : Concentration des métaux disponibles au recyclage dans les flux de DEEE (PAM IT et Ecrans) (ADEME, 2021) vs. concentrations typiques dans les minerais (AREP, 2023)	86
Figure 32 : Nombre total d'équipements en France pour l'état des lieux, le scénario tendanciel 2030 et cinq scénarios à 2050 (d'après ADEME-ADEME, 2022).....	95
Figure 33 : Nombre total d'équipements pour l'état des lieux, le scénario tendanciel 2030 et cinq scénarios à 2050 hors IoT (d'après ADEME-ADEME, 2022).....	95

Figure 34 : Taux de croissance du nombre d'équipements d'ici 2050 pour tous les équipements pour le scénario tendanciel (Deloitte d'après ADEME-Arcep, 2022).....	96
Figure 35 : Taux de croissance du nombre d'équipements d'ici 2050 hors équipements IoT et casques AR-VR pour le scénario tendanciel (Deloitte d'après ADEME-Arcep, 2022)	96
Figure 36 : Taux de croissance de la masse des métaux d'ici 2050 (scénario tendanciel, hors substitutions) – Tous métaux	97
Figure 37 : Taux de croissance de la masse des métaux d'ici 2050 (scénario tendanciel, hors substitutions) – Hors gallium et yttrium.....	97
Figure 38 : Comparaison entre les taux de croissance de la masse des métaux 2020-2050 (scénario tendanciel, hors substitutions) avec l'évolution de deux indicateurs de l'étude ADEME-Arcep (2022) – échelle logarithmique.....	99
Figure 39 : Destinations finales du gisement de DEEE professionnels en 2019 (kt) (OCAD3E, 2021b).....	130
Figure 40 : Cartographie générale des destinations du gisement d'écrans ménagers en 2019, en kt (OCAD3E, 2021)	131
Figure 41 : Cartographie du gisement 2019 PAM en kt (OCAD3E, 2021)	132
Figure 42 : Nombre d'équipements pour lesquels des données étaient disponibles, par métal (Deloitte, d'après diverses données)	134
Figure 43 : Taux de croissance 2020-2050 du besoin en sept métaux selon trois niveaux de substitution dans le cadre d'un scénario tendanciel (Deloitte, d'après diverses données).....	137
Figure 44 : Analyse croisée des taux de croissance des besoins en métaux 2020-2050 (en %) et des scores de criticité sur les réserves et la disponibilité des métaux (note de 0 à 10).....	138

TABLEAUX

Tableau 1 : Principaux risques environnementaux à chaque étape de traitement des métaux.....	19
Tableau 2 : Premières causes de rupture d'approvisionnement identifiées par métal (Hatayama et Tahara, 2018).....	23
Tableau 3 : Equipements numériques considérés dans le périmètre de l'étude	27
Tableau 4 : Indicateurs sélectionnés pour la phase de production des métaux.....	30
Tableau 5 : Représentation de la chaîne de valeur des métaux utilisée dans l'étude	32
Tableau 6 : Indicateurs de criticité utilisés dans la présente étude.....	33
Tableau 7 : données présentées dans les fiches métaux relatives aux prix des métaux	34
Tableau 8 : Données relatives au recyclage des métaux contenus dans les équipements numériques ...	34
Tableau 9 : Format de tableau listant les acteurs majeurs de la récupération du métal issu des composants ou fractions récupérées à l'étape de tri des DEEE	34
Tableau 10 : Méthodologie utilisée pour obtenir des données générales sur les équipements	35
Tableau 11 : Méthode d'estimation du contenu métallique des équipements inclus dans le périmètre d'étude.....	36
Tableau 12 : Liste des scénarios à 2030 et 2050 retenus dans le cadre de la présente étude (d'après ADEME, 2024).....	37
Tableau 13 : Méthodologie d'évaluation du nombre d'équipements en 2030 et 2050.....	38
Tableau 14 : Récapitulatif des variables à 2030/2050 sélectionnées	39
Tableau 15 : Caractéristiques recensées des métaux pour application dans le secteur numérique	41
Tableau 16 : Métaux utilisés dans les composants numériques. Sources : Elementarium, Mineral Info, JRC 2023, CRM 2020 Critical Factsheets et CRM 2020 Non-Critical Factsheets.....	42
Tableau 17 : Principaux indicateurs sur le contenu moyen en métaux de vingt équipements numériques (Deloitte, d'après diverses données)	44
Tableau 18 : Tonnages d'équipements ménagers collectés en 2020 par les deux éco-organismes agréés pour les deux principales de catégories de DEEE numériques en France (Calcul Deloitte d'après ADEME, 2021)	58
Tableau 19 : Taux de collecte en France des DEEE ménagers et professionnels par rapport aux mises sur le marché et au gisement estimé en 2019 (OCAD3E, 2021c).....	59
Tableau 20 : Quantités réemployées et réutilisées par filière et par catégorie en France (d'après ADEME, 2021b).....	61
Tableau 21 : Liste des sites de traitement des fractions DEEE en France (ADEME, 2019).....	62
Tableau 22 : Nombre de sites de traitement en France de DEEE par type d'activité et déchets traités – données SINOE® 2024.....	63
Tableau 23 : Composition des DEEE ménagers en France, tous DEEE confondus (campagne de caractérisation des éco-organismes, données 2019) (ADEME, 2021).....	63
Tableau 24 : Principales fractions extraites des équipements numériques (PAM et écrans plats) et leurs destinations (Deloitte, d'après données d'expert)	64
Tableau 25 : Répartition des tonnages d'équipements ménagers traités en 2019 par type de traitement et par catégorie en France (ADEME, 2020a).....	65

Tableau 26 : Répartition des différents matériaux/composants pour les Petits Appareils en Mélange (PAM) et taux de recyclage et de valorisation associés en 2019 (d'après ADEME, 2020b).....	66
Tableau 27 : Répartition des différents matériaux/composants pour les écrans plats et taux de recyclage et de valorisation associés en 2019 (d'après ADEME, 2020b).....	66
Tableau 28 : Liste des récupérateurs de métaux issus d'équipements électroniques en France et dans l'UE	74
Tableau 29 : Récapitulatif des niveaux de recyclage de 25 métaux utilisés dans le secteur du numérique	87
Tableau 30 : Nature des freins à la valorisation en recyclage des métaux issus des (D)EEE	74
Tableau 31 : Synthèse des difficultés rencontrées et exprimées par les 38 structures visitées (ADEME, 2021b).....	78
Tableau 32 : Taux de réemploi et de réutilisation des différents types de DEEE en France en 2022 (Ecologic, 2023).....	79
Tableau 33 : Présentation des quatre scénarios 2050 pour le secteur du numérique (d'après ADEME, 2024 et ADEME-Arcep, 2022).....	88
Tableau 34 : Hypothèses générales des quatre scénarios concernant le nombre d'équipements numériques (d'après ADEME, 2024 et ADEME-Arcep, 2022).....	89
Tableau 35 : Récapitulatif des niveaux de substitution des cinq variables prioritaires « Métaux et numérique 2050 »	90
Tableau 36 : Paramètres de modélisation des cinq variables prioritaires « Métaux et numérique 2050 »	90
Tableau 37 : Eléments d'analyse qualitatifs de cinq variables « Métaux et numérique 2050 ».....	93
Tableau 38 : Coefficients multiplicateurs de la masse de 24 métaux dans 20 équipements dans le parc français en 2030 et 2050 par rapport à 2020 (hors substitutions).....	98
Tableau 39 : Implications des scénarios Transition(s) 2050 sur les chaînes de valeurs des métaux du numérique	111
Tableau 40 : Principaux risques et opportunités associés aux différentes étapes de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le numérique en 2050.....	112
Tableau 41 : Symboles utilisés pour les éléments chimiques	123
Tableau 42 : Comparaison des catégories d'appareils électroniques par rapport aux appareils pris en compte dans l'étude Deloitte. La description de chaque catégorie et les exemples sont tirés de l'annexe III de la directive UE 2012/19/CE.	124
Tableau 43 : Objectifs présents dans la directive DEEE (2012/19/EU) et repris par l'arrêté du 8 octobre 2014 (dans le périmètre de l'étude).	125
Tableau 44 : Nombre de métaux pour lesquels des données de concentration ont été disponibles, par équipement (Deloitte, d'après diverses données).....	135
Tableau 45 : Comparaison des taux de croissance 2020-2050 par métal, par scénario et par niveau de substitution	136

7. Annexes

7.1. Annexe : Symboles utilisés pour les éléments chimiques

Tableau 41 : Symboles utilisés pour les éléments chimiques

Symbole	Métal	Symbole	Métal
Al	Aluminium	Ni	Nickel
Sb	Antimoine	Au	Or
Ag	Argent	Pd	Palladium
Co	Cobalt	Pt	Platine
Cu	Cuivre	Ru	Ruthénium
Sn	Etain	Si	Silicium
Ga	Gallium	Ta	Tantale
Ge	Germanium	Pr, Nd	Praséodyme, Néodyme (terres rares légères)
In	Indium	Dy	Dysprosium (terre rare lourde)
Li	Lithium	W	Tungstène
Mn	Manganèse	Y	Yttrium
Mg	Magnésium	Zn	Zinc

7.2. Annexe : Contexte réglementaire de la fin de vie des équipements numériques

7.2.1. Cadre réglementaire européen

7.2.1.1. Réglementation relative aux DEEE

Le cadre réglementaire européen actuel sur les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) s'appuie sur la directive DEEE II (2012/19/EU), une révision de la version originale de 2002 dont le champ d'application initial a été modifié en 2018. Cette modification a en pratique entraîné un renversement de logique, passant d'un champ d'application de la directive sur un ensemble d'équipements spécifiques listés dans 11 catégories, à une inclusion « a priori » de tous les équipements électroniques, à l'exception de ceux explicitement exclus par la directive actuelle⁷⁷.

Les équipements électriques et électroniques doivent désormais être classés dans l'une des huit nouvelles catégories définies par la Directive :

1. Équipements d'échange thermique ;
2. Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm² ;
3. Lampes ;
4. Gros équipements ;
5. Petits équipements
6. Petits équipements informatiques et de télécommunications ;
7. Panneaux photovoltaïques ;
8. Cycles à pédalage assisté et engins de déplacement personnel motorisés.

Les catégories « ouvertes » (« 4. Gros équipements » et « 5. Petits équipements ») permettent de classer tout équipement électrique et électronique qui n'entre pas dans les catégories plus spécifiques, en se basant uniquement sur ses dimensions (supérieures ou non à 50 cm)⁷⁸.

⁷⁷ Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

⁷⁸ Arrêté du 8 octobre 2014 modifiant l'arrêté du 23 novembre 2005 relatif aux modalités de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques prévues à l'article 21 du décret n° 2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements.

Le Tableau 42 présente des exemples de produits électroniques entrant dans chaque catégorie et mentionnés dans l'annexe III de la directive DEEE 2012. Il est également précisé dans laquelle de ces catégories se situe les équipements faisant l'objet de la présente étude. A noter que la majorité des équipements numériques du périmètre de l'étude font partie des catégories 02 (« Ecrans ») et 06 (« Petits équipements IT »).

Tableau 42 : Comparaison des catégories d'appareils électroniques par rapport aux appareils pris en compte dans l'étude Deloitte. La description de chaque catégorie et les exemples sont tirés de l'annexe III de la directive UE 2012/19/CE.

Catégories	Descriptions et exemples	Équipements couverts par l'étude
CAT02	Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 10 cm ² .	<ul style="list-style-type: none"> • Téléviseurs ; • Ordinateurs portables ; • Ecrans d'ordinateurs ; • Autres écrans.
CAT04	Gros équipements (dont l'une des dimensions extérieures au moins est supérieure à 50 cm)	<ul style="list-style-type: none"> • Serveurs (fournissant la puissance de calcul) ; • Stockage (HDD et SSD utilisés pour stocker les données) ; • Réseau agrégation / backbone (fibre optique) ; • Stations de base.
CAT05	Petits équipements (dont toutes les dimensions extérieures sont inférieures ou égales 50 cm) : appareils ménagers ; matériel grand public ; luminaires ; équipements destinés à reproduire des sons ou des images, équipements musicaux ; outils électriques et électroniques ; jouets, équipements de loisir et de sport ; dispositifs médicaux ; instruments de surveillance et de contrôle ; distributeurs automatiques ; équipements pour la production de courants électriques.	<ul style="list-style-type: none"> • Consoles de jeux vidéo de salon
CAT06	Petits équipements informatiques et de télécommunications : téléphones portables, GPS, calculatrices de poche, routeurs, ordinateurs individuels, imprimantes, téléphones.	<ul style="list-style-type: none"> • Tablettes ; • Smartphones ; • Ordinateurs portables ; • Box TV ; • Objets connectés IoT ; • Stations d'accueil ; • Box internet.

La Directive DEEE (2012/19/CE) dispose également que :

- Chaque État membre doit gérer la collecte, la séparation et le traitement des DEEE sur la base du système de responsabilité élargie des producteurs (dit R P - cf. section 4.1) ;
- Des **objectifs de réutilisation, recyclage et valorisation**, sont prévus pour chaque catégorie et présentés en Tableau 43. Ces objectifs ont été transposés dans la réglementation française à travers l'arrêté du 8 octobre 2014⁷⁹.

⁷⁹ Arrêté du 8 octobre 2014 modifiant l'arrêté du 23 novembre 2005 relatif aux modalités de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques prévues à l'article 21 du décret n° 2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements

Tableau 43 : Objectifs présents dans la directive DEEE (2012/19/EU) et repris par l'arrêté du 8 octobre 2014 (dans le périmètre de l'étude).

Catégories d'équipements		Objectifs minimaux valables à partir de 2019	
		Réutilisation et recyclage	Valorisation ⁸⁰
CAT02	Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ² .	70 %	80 %
CAT04	Gros équipements	80 %	85 %
CAT05	Petits équipements	55 %	75 %
CAT06	Petits équipements informatiques et de télécommunications	70 %	80 %

En ce qui concerne la méthodologie de calcul, l'arrêté du 8 octobre 2014 indique que « la réalisation des objectifs [...] est calculée, pour chaque catégorie, en prenant le poids des DEEE qui entrent dans l'installation de valorisation ou de recyclage ou de préparation en vue de la réutilisation, après un traitement approprié [...] en ce qui concerne la valorisation ou le recyclage, et en exprimant ce poids en pourcentage du poids de l'ensemble des DEEE collectés séparément pour cette catégorie. Les activités préliminaires, comme le tri et le stockage préalables à la valorisation, ne sont pas comptabilisées pour la réalisation de ces objectifs ». En France, les calculs des taux de recyclage sont réalisés à la suite de campagnes de caractérisation⁸¹ effectuées sur chacun des sites de traitement.

Focus sur l'évaluation et la révision de la Directive DEEE

Après une consultation publique en ligne sur l'évaluation de la directive DEEE de juin à septembre 2023 (CE, 2023b), la Commission européenne évalue actuellement la directive DEEE. Cette évaluation permettra de déterminer si la directive est toujours adaptée à son objectif, d'explorer les possibilités de simplifier la directive et de déterminer si une révision est nécessaire.

Le rapport final de l'étude sera rendu public d'ici septembre 2024. La Commission européenne pourrait ensuite lancer un **processus de révision de la directive** (CE, 2024).

7.2.1.2. Règlementation relative aux substances dangereuses et effet sur la fin de vie des DEEE

En application de la Directive DEEE (2012/19/CE), certains composants qui contiennent des métaux présentant un danger ou un intérêt spécifique doivent être retirés à l'étape de traitement (article 8). Le règlement batterie en revanche prévoit dans son Annexe I des restrictions à l'utilisation de métaux dans les piles/batteries, tels que le cadmium, le mercure et le plomb⁸⁵.

Ceci démontre la double logique de la réglementation actuelle qui vise en même temps à :

1. Avoir des procédés de traitement des DEEE qui séparent les composants contenant des substances dangereuses ;
2. Avoir des substances dont l'utilisation se réduit progressivement dans les EEE (ex. plomb).

La Directive DEEE s'applique aux déchets et non aux produits, mais s'appuie sur les réglementations suivantes sur les produits en y faisant référence :

⁸⁰ La valorisation comprend le recyclage, la valorisation énergétique, la réutilisation par pièces et la préparation à la réutilisation. Les définitions sont énoncées à l'article 3 de la directive 2008/98/CE.

⁸¹ La législation impose l'atteinte de taux de recyclage, de valorisation et d'élimination en fonction du flux de DEEE traités. Les éco-organismes doivent garantir que ces objectifs sont bien atteints et contrôlent à cet effet leurs prestataires en effectuant des audits techniques. Dans le cadre de ces audits, ils organisent avec le prestataire audité le traitement d'un lot de DEEE représentatif pour le site audité (Ecologic, 2023).

- La Directive RoHS (2011/65/EU)⁸², dont l'objectif principal est de réduire le risque pour la santé humaine et l'environnement en remplaçant et en limitant les substances chimiques dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. Un exemple est le remplacement de l'alliage plomb-étain par un alliage étain-argent pour les soudures. Cette directive a été transposée en droit français par le décret 2013-988⁸³ ;
- Le règlement REACH (1907/2006/EU)⁸⁴ réglemente l'utilisation des substances chimiques, y compris celles présentant des dangers pour la santé humaine et l'environnement.

7.2.1.3. Règlementation relative aux batteries

La gestion des batteries et piles, même contenus dans des équipements électriques et électroniques, répond à une réglementation distincte. Le règlement (UE) 2023/1542, dit **règlement « batteries »**⁸⁵, entré en vigueur en 2023, comprend en effet des mesures spécifiques visant à orienter l'industrie de la fabrication de piles/batteries vers des opérations circulaires grâce à des mesures telles que l'écoconception obligatoire, des exigences de performance et de durabilité (ex. pour les batteries rechargeables : capacité nominale, maintien et récupération de la charge, durée de vie en cyclage, résistance aux fuites) et le contenu recyclé, ainsi que des objectifs de recyclage.

Le règlement prévoit, à 2025, **cinq nouvelles catégories de batteries** : batteries portables ; batteries industrielles (avec un design particulier et des dimensions importantes) ; batteries de véhicules de mobilité légère ; batteries de véhicules électriques et hybrides ; batteries pour usage automobile (batterie de démarrage ou éclairage) (Corepile, 2023).

Il inclut en particulier pour les **batteries portables**, que l'on retrouve souvent dans les équipements étudiés dans la présente étude :

- Des objectifs plus stricts en matière de **collecte des déchets** :

	2023	2027	2030
Batteries portables	45 %	63 %	73 %

- Des **objectifs de rendement de recyclage** par type de batteries (dont celles utilisées par le secteur du numérique) en % du poids moyen :

	2025	2030
Lithium	65 %	70 %
Autres déchets de batteries (hors batteries au plomb et batteries nickel-cadmium)	50 %	N/A

- Des **objectifs de valorisation des matières**⁴⁸ à partir des déchets collectés de batteries, dont celles utilisées par le secteur du numérique :

⁸² Directive 2011/65/UE du Parlement européen et du conseil du 8 juin 2011 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

⁸³ Décret n° 2013-988 du 6 novembre 2013 relatif à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques

⁸⁴ Règlement (CE) N° 1907/2006 du Parlement Européen et du conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques

⁸⁵ Règlement (UE) 2023/1542 du Parlement européen et du Conseil du 12 juillet 2023 relatif aux batteries et aux déchets de batteries

	2027	2031
Lithium	50 %	80 %
Cobalt, Cuivre, Nickel	90 %	95 %

En ce qui concerne la responsabilité élargie des producteurs, aucun changement structurel n'a été proposé, car il s'agit essentiellement d'ajuster les dispositions existantes dans le cadre de la précédente Directive sur les Batteries⁸⁶. Les États membres devront définir la responsabilité élargie des producteurs prévue par le présent règlement, conformément à la directive 2008/98/CE⁸⁷ et à la législation nationale transposant cette directive.

La réglementation européenne obligera les fabricants à mettre sur le marché des appareils dont les batteries sont extractibles à partir de 2024 avec un délai de 3 à 4 ans. Des dérogations seront possibles pour certains appareils plats (ex. tablettes, objets connectés IoT) (Corepile, 2023).

7.2.1.4. Politiques publiques relatives aux matières premières critiques

La stratégie de l'Union européenne sur les matières premières critiques s'oriente depuis plusieurs années vers le recyclage des métaux dans les équipements électroniques. Depuis 2011, l'Initiative sur les Matières Premières Critiques (MPC) a permis d'établir une liste triennale de matières jugées critiques pour l'économie européenne (CE, 2020). Le 16 mars 2023, la Commission européenne a proposé un « **Critical Raw Materials Act** »⁸⁸ (CRMA), dont l'objectif est de garantir l'accès de l'UE à un approvisionnement sûr et durable en MPC. Le CRMA poursuit quatre objectifs spécifiques, dont celui que la capacité de recyclage⁸⁹ (CE, 2023).

Le 18 mars 2024, le Conseil de l'UE a adopté le règlement, dernière étape de la procédure décisionnelle permettant au texte d'entrer en vigueur. Le texte final :

- **Dresse deux listes de matières (34 critiques et 17 stratégiques)** qui sont essentielles pour les transitions écologique et numérique, ainsi que pour les industries spatiale et de la défense ;
- **Etablit trois niveaux de référence pour la consommation annuelle de matières premières** de l'Union : 10 % provenant de l'extraction locale, 40 % de transformation dans l'Union et 25 % issues de matières recyclées ;
- **Facilite le développement de projets stratégiques.** A ce titre, les États membres créeront des points de contact uniques au niveau administratif et au stade pertinents de la chaîne de valeur des matières premières critiques. Les projets de recyclage et de transformation devraient recevoir leurs autorisations dans un délai de 15 mois, « à quelques exceptions près visant à garantir un dialogue constructif avec les communautés locales concernées par les projets ainsi qu'une évaluation appropriée des incidences sur l'environnement dans les cas complexes » (Conseil de l'UE, 2024).

La liste des MPC a été préparée par la Commission en fonction de leur **importance économique** et du **risque d'approvisionnement**. Pour établir la liste des « matières premières stratégiques », la Commission

⁸⁶ Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators

⁸⁷ Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives

⁸⁸ Proposition de Règlement du Parlement Européen et du Conseil établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 et (UE) 2019/1020. COM/2023/160 final

⁸⁹ Le règlement définit la capacité de recyclage de l'UE comme le « total du volume annuel de production maximal qui résulte d'opérations de recyclage concernant des matières premières stratégiques qui sont réalisées dans l'Union, y compris le tri et le prétraitement des déchets et leur transformation en matières premières secondaires »

a évalué leur pertinence pour la transition verte et numérique, ainsi que pour les applications dans les domaines de la défense et de l'espace (Beer, 2023).

A ce titre, en octobre 2024, le Ministère de la Transition écologique a annoncé le lancement de travaux pour élaborer un **plan de circularité sur les matières premières critiques**, comprenant un groupe de travail sur les équipements électriques et électroniques.

7.2.2. Cadre réglementaire français

7.2.2.1. La filière REP DEEE est la consécration en France de la réglementation européenne sur les DEEE

La directive DEEE (2012/19/CE) a été transposée en droit français en plusieurs étapes, pour aboutir au décret 2014-928 du 19 août 2014. Ce dernier a été à son tour précisé au fil des années par une série d'arrêtés qui ont conduit à la création de l'actuelle filière française de collecte et de traitement des DEEE (ADEME, 2021).

Dès 2006, la France disposait déjà de deux filières distinctes : la filière des déchets d'équipements ménagers et celle des déchets d'équipements professionnels. Tous les déchets de ces deux filières entrent dans les 8 catégories proposées par la directive DEEE de 2012 (cf. section 7.2.1).

La filière à responsabilité élargie des producteurs (REP) est contrôlée au moyen d'un **registre DEEE** géré par l'ADEME. Chaque producteur d'EEE doit s'y inscrire et déclarer les informations suivantes (ADEME, 2020) :

- Les quantités d'EEE mis sur le marché national ;
- Les quantités de DEEE collectées en France, puis traitées, en France ou à l'étranger, par site de traitement, ainsi que les quantités de certains composants ou substances spécifiques issus du traitement de ces déchets.

- L'éco-contribution et l'éco-modulation sont au cœur des dynamiques des éco-organismes de la filière DEEE

En application du principe de la responsabilité élargie du producteur, **les metteurs en marché d'équipements électroniques payent une « éco-contribution »**, un soutien financier accordé aux éco-organismes pour gérer le traitement de leurs produits à la fin de leur cycle de vie. Cette dernière est également modulée par produit en fonction de certains critères environnementaux (Vernier, 2018).

L'éco-modulation a été entérinée dans la loi AGEC⁹⁰ : « La modulation prend la forme d'une prime accordée par l'éco-organisme au producteur lorsque le produit remplit les critères de performance et celle d'une pénalité due par le producteur à l'éco-organisme lorsque le produit s'en éloigne ». Cette loi va plus loin et permet désormais une modulation non pas sur le montant de l'écocontribution mais sur le montant total de l'équipement : « une évaluation de la trajectoire d'atteinte des objectifs est menée afin de renforcer le niveau des modulations [...] L'éco-organisme est tenu de limiter le montant de la prime ou de la pénalité à 20% du prix de vente hors taxe de son produit ». Jusqu'à présent, **les éco-organismes ont pris le parti de ne faire que des primes** (remarque du COPIL).

A noter : Les contributions financières versées par les producteurs qui remplissent collectivement les obligations mentionnées à l'article L. 541-10 sont modulées, lorsque cela est possible au regard des meilleures techniques disponibles en fonction de critères de performance environnementale décrits dans l'article L.541-10-3 et dont certains sont liés à la consommation de métaux (ex. quantité de matière utilisée, incorporation de matière recyclée, réparabilité).

⁹⁰ Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire.

- **L'organisation des filières DEEE professionnels et ménagers tendent à s'homogénéiser**

D'une part, les producteurs d'équipements ménagers (ou assimilés ménagers) peuvent soit mettre en place et faire approuver/agréer un système individuel de collecte et de traitement, soit adhérer à un éco-organisme agréé pour la collecte et le traitement des équipements ménagers (en 2021: Ecologic, ecosystem, Soren⁹¹). Aujourd'hui, **la quasi-totalité des producteurs d'équipements ménagers adhèrent à un éco-organisme agréé** ; en 2021, un seul système individuel « ménager » avait été approuvé.

D'autre part, **la loi AGECE a mis fin aux systèmes individuels attestés pour les DEEE professionnels** : tous les producteurs de DEEE professionnels sont donc soumis aux mêmes obligations que les fabricants de DEEE ménagers. Désormais, ils peuvent soit mettre en place un système individuel de collecte et de traitement (qui doit être agréé par le ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires)⁹², soit adhérer à un éco-organisme agréé pour la collecte et le traitement de ces équipements (Ecologic et ecosystem).

7.2.2.2. La France s'est dotée de réglementations sur la réutilisation et le réemploi des DEEE du secteur du numérique

La réglementation française prévoit que les DEEE peuvent être traités selon les principes de l'Économie sociale et solidaire (ESS). Cette possibilité est structurée par diverses dispositions réglementaires, la première étant celle prévue par la loi antigaspillage pour une économie circulaire (dite « loi Agec ») de 2020⁹³. L'article L541-10 du code de l'environnement prévoit pour la filière DEEE un cahier des charges plus contraignant par rapport à la plupart des filières REP, car il précise les conditions d'un recours à des entreprises solidaires d'utilité sociale (E.S.U.S.).

La loi Agec a mis en place une série d'initiatives, parmi lesquelles on peut trouver :

- La mise en place d'un fonds visant à promouvoir la réparation et la réutilisation, en particulier pour les équipements électriques et électroniques. Celui-ci s'est concrétisé par l'annonce en novembre 2022 du **bonus réparation** issu d'un fonds de 410 millions d'euros pour six ans et géré par les éco-organismes agréés par l'État (Gouvernement, 2022) ;
- L'introduction d'un Indice de réparabilité spécifique aux produits EEE, à partir de 2021. À horizon 2024, la loi Agec prévoit que cet indice devienne un indice de durabilité, notamment par l'ajout de nouveaux critères comme la robustesse ou la fiabilité des produits.

Par ailleurs, l'arrêté du 27 octobre 2021 sur les cahiers des charges des éco-organismes :

- Organise la **mise à disposition par l'éco-organisme « d'EEE usagés » aux opérateurs** limitativement énumérés (Convention 5.4 du Cahier des Charges). Par exemple, ecosystem a déployé un référencement des acteurs du réemploi pour contribuer au développement de leurs activités, via deux mécanismes : le Fonds RR ESS, réservé aux acteurs de l'ESS et le dispositif « Convention 5.4 » ouvert aux opérateurs qui assurent le réemploi, la préparation en vue de la réutilisation des EEE, la préparation de produits reconditionnés (ecosystem, 2023b) ;
- Etablit une **obligation annuelle de réutilisation et de réemploi des produits**, calculée par la quantité (en masse) d'EEE usagés qui ont fait l'objet d'une opération de réemploi ou d'une opération de préparation en vue de la réutilisation durant l'année considérée, rapportée à la quantité (en masse) d'EEE mis sur le marché durant l'année précédente⁹⁴ :

⁹¹ Soren (ex-PV Cycle) est le troisième éco-organisme et couvre 8 % des DEEE ménagers (en masse) et s'occupe principalement des panneaux photovoltaïques, qui ne sont pas inclus dans le périmètre de la présente étude (Calcul Deloitte d'après ADEME, 2021).

⁹² Depuis 2012, les systèmes individuels professionnels doivent fournir une attestation de conformité réglementaire annuellement pendant la période de déclaration, qui consiste en un engagement du producteur à s'acquitter de ses obligations, lors de sa déclaration au Registre DEEE (ADEME, 2021).

⁹³ Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire.

⁹⁴ Arrêté du 27 octobre 2021 portant cahiers des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des équipements électriques et électroniques.

Objectif de réemploi et réutilisation applicables à compter de l'année 2023

Pourcentage minimal d'EEE usagés qui ont fait l'objet d'une opération réemploi ou d'une opération de préparation en vue de la réutilisation

2 %

7.3. Annexe : Flux de déchets en fin de vie des DEEE

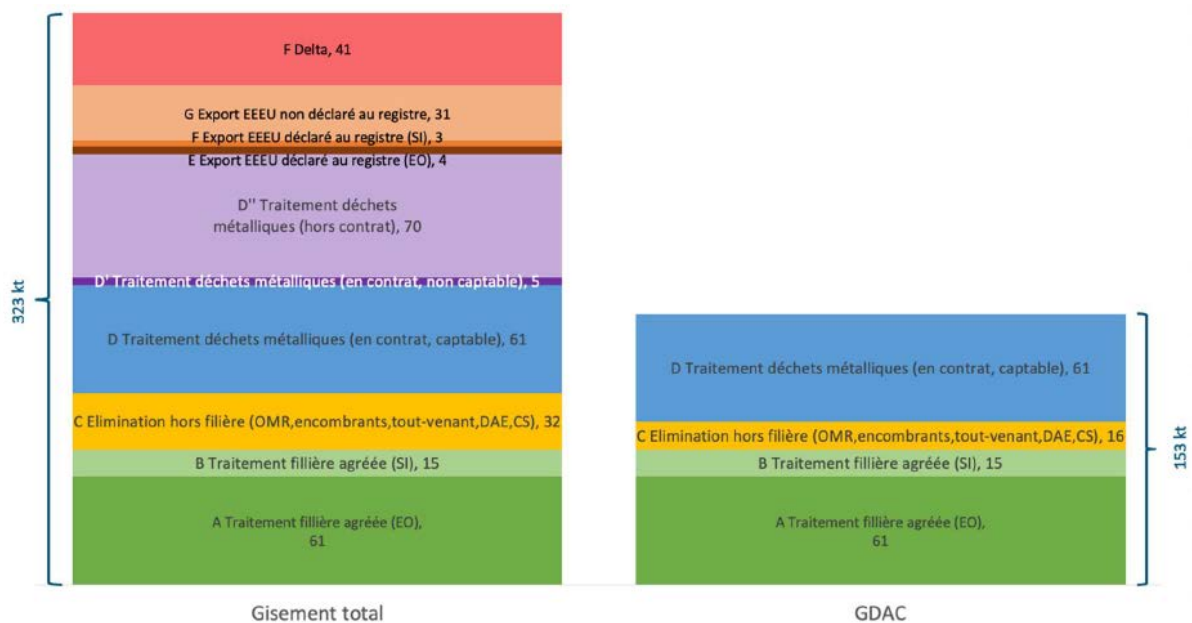


Figure 39 : Destinations finales du gisement de DEEE professionnels en 2019 (kt) (OCAD3E, 2021b)

GDAC : Gisement disponible à la collecte ; EEEU : Équipements électriques et électroniques usagés ; OMR : Ordures ménagères résiduelles ; DAE : Déchets d'activités économiques ; CS : Collecte sélective ; EO : Eco-organisme ; SI : Système Individuel.

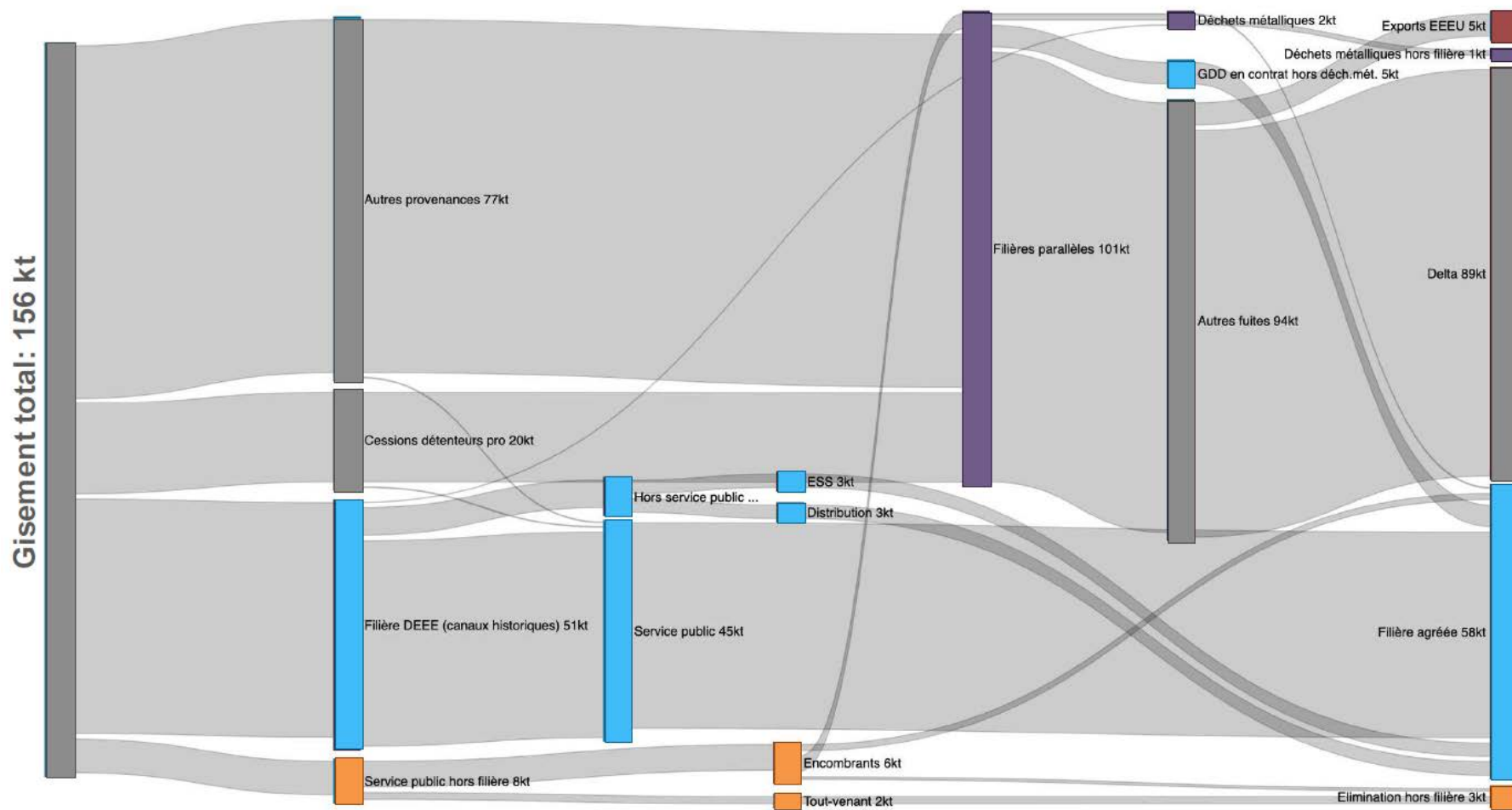


Figure 40 : Cartographie générale des destinations du gisement d'écrans ménagers en 2019, en kt (OCAD3E, 2021)

EEEU : Équipements électriques et électroniques usagés

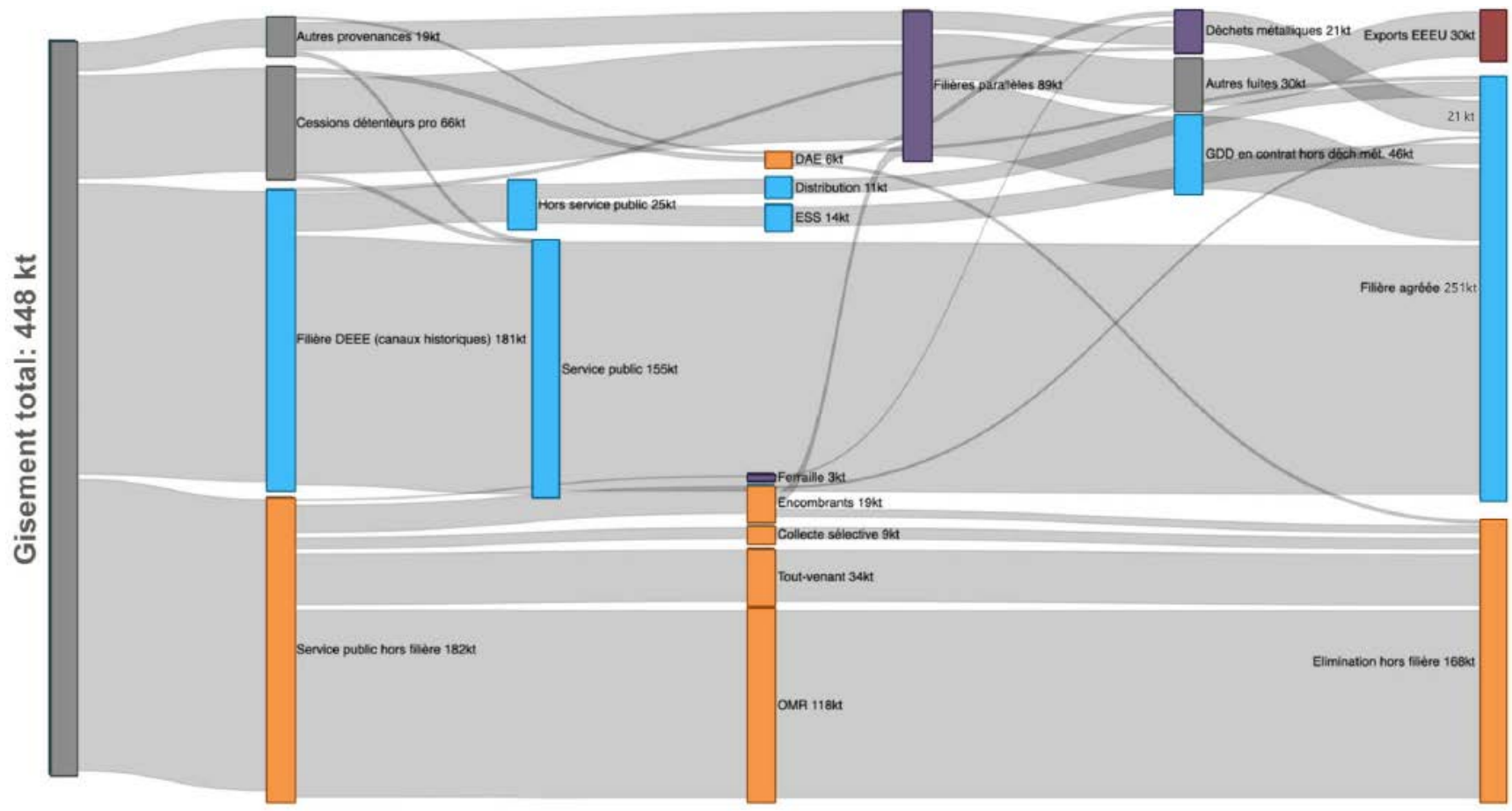


Figure 41 : Cartographie du gisement 2019 PAM en kt (OCAD3E, 2021)

EEEU : Équipements électriques et électroniques usagés ; GDD : gestionnaire de déchets

7.4. Annexe : Chaine de valeur du recyclage des piles et accumulateurs en France

- **Du point de vue de la collecte, les piles et accumulateurs (P&A) issus des DEEE se trouvent principalement dans les petits appareils en mélange (PAM).**

Les piles et accumulateurs issus du démantèlement DEEE représentaient environ 520 tonnes pour en 2022. Les experts en recyclage des P&A ne disposent de l'origine des DEEE mais estiment qu'ils sont principalement issus de PAM (ex. téléphonie, informatique, outillage, jouets).

Les compositions chimiques des piles et batteries des PAM (dont 30 % de batteries Li-ion) sont différentes des lots en mélange issus de magasins et déchetteries (moins de 10 % de batteries Li-ion, essentiellement des piles alcalines/salines) (Corepile, 2023).

- **Une fois collectées, les batteries sont majoritairement recyclées et non réemployées/réutilisées**

Pour l'instant le recyclage est largement privilégié, mais le cadre réglementaire européen sur le reconditionnement pourrait se développer, en particulier dans le secteur de la mobilité plutôt que dans le secteur du numérique. Selon un expert, les fabricants d'équipements numériques auraient tendance à s'y opposer en raison des dangers éventuels, notamment pour les smartphones (Corepile, 2023).

Plus spécifiquement, les batteries au lithium doivent être extraites des DEEE car leur présence dans les équipements numériques entraîne un risque de départ de feu lors de leur recyclage. Or, celles-ci sont difficilement extractibles et ne sont pas systématiquement retirées aujourd'hui. Selon une caractérisation d'une tonne de téléphones usagés, entre 20 et 30 % des téléphones comprenaient encore des batteries (Terra Nova Développement, 2024).

- **Plusieurs technologies sont utilisées pour récupérer les métaux dans les batteries et dans les piles alcalines et salines**

Pour les batteries, des procédés d'hydrométallurgie, de pyrométallurgie, ou une approche mixte, sont utilisés pour la récupération des métaux. Les acteurs de l'extraction des métaux des batteries divulguent très peu d'informations à ce sujet, notamment pour éviter de perdre leur avantage concurrentiel et de créer des filières parallèles.

Pour les piles alcalines et salines, il existe trois principaux procédés de récupération des métaux :

1. **Filière broyage et recyclage four Waelz.** Après broyage des piles, l'acteur en charge sépare la fraction métallique, qui est vendue à des aciéristes, et de la fraction papier-plastique, qui est enfouie ou incinérée. Il lui reste alors la *black mass*, matière active de la pile (oxyde de zinc et de manganèse). Cette *black mass* est envoyée vers un four Waelz spécialisé dans la récupération du zinc. Le zinc est concentré et transformé en oxyde de zinc et est ensuite vendu pour purification/utilisation (pigment peinture, verre ou céramique, lubrifiants, etc.). Il existe de très nombreux débouchés pour l'oxyde de zinc donc il n'est pas nécessaire de revenir à l'élément métallique. Le manganèse se retrouve dans les scories et est très peu valorisé ;
2. **Filière pyrométallurgique.** Les piles sont envoyées dans un four de fusion (bain métallique) et sont fondues avec d'autres déchets métalliques et des batteries nickel. Les différents métaux se retrouvent dans des lingots de ferronickel, qui sont très recherchés par l'industrie aéronautique. Le zinc, est évaporé dans les fumées et ensuite envoyé en four Waelz ;
3. **Filière pyrométallurgie fonderie.** Les piles sont envoyées avec d'autres déchets métalliques et/ou de la fonte dans un cubilot de fabrication de fonte. Le fer et le manganèse des piles sont alors transférée dans la fonte. Les poussières de zinc sont récupérées dans les fumées pour être envoyées en four Waelz (Corepile, 2023).

- **De nombreux métaux sont récupérés dans les batteries et piles usagées.**

Selon un expert en recyclage des piles et accumulateurs, une fois que les métaux ont été triés, ils sont recyclés à différents degrés. Les métaux récupérés sont les suivants :

- Le lithium, aujourd’hui, généralement perdu, mais le secteur sera bientôt contraint de le récupérer ;
- L’aluminium, qui est très peu présent dans les P&A ;
- Le manganèse (piles alcalines) est plus difficile à recycler et se retrouve souvent dans les scories ;
- Le cobalt, le nickel et le cuivre (technologies rechargeables) ;
- Le zinc (piles alcalines).

Entre 10 et 15 % des revenus de Corepile, éco-organisme de la filière REP P&A, seraient liés à la revente de matières premières de recyclage, comme le plomb, le nickel et le cobalt.

En général, les acteurs de l’extraction des métaux dans les P&A usagés préparent des produits pour des acteurs métallurgiques qui produisent ensuite des alliages métalliques. **Il est très peu fréquent dans les procédés de recyclage des P&A que l’on revienne à l’élément chimique** (Corepile, 2023).

7.5. Annexe : Résultats additionnels de l’analyse prospective à 2050

7.5.1. Annexe : Disponibilité des données de composition métallique

Synthèse du nombre d’équipements pour lesquels des données de composition métallique étaient disponibles

La Figure 42 représente schématiquement l’**accès aux données de composition métallique** pour chaque métal. Les données concernant l’aluminium (disponibles pour 18 équipements) et pour le cuivre, l’argent et l’or (17 équipements) sont les plus disponibles. A l’inverse, les concentrations en manganèse ou en titane sont peu connues (une donnée disponible), ce qui peut s’expliquer par deux raisons : soit ces métaux sont peu présents dans les équipements étudiés, soit les ressources bibliographiques utilisées ne les recensent pas.

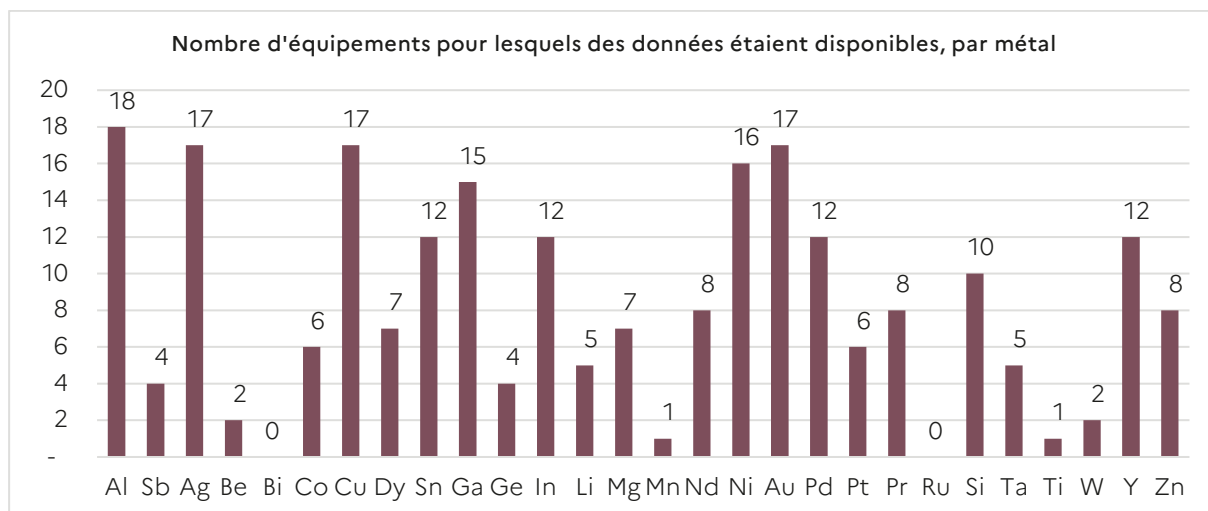


Figure 42 : Nombre d’équipements pour lesquels des données étaient disponibles, par métal (Deloitte, d’après diverses données)

Présentation détaillée du nombre d’équipements pour lesquels des données de composition métallique étaient disponibles

Le Tableau 44 indique, pour chaque équipement, les **métaux dont les concentrations unitaires ont pu être évaluées**. Par exemple, pour les box TV, on connaît les concentrations en aluminium, argent, cuivre, étain, nickel, or, palladium, silicium et zinc.

A noter : Dans le tableau ci-dessous, une case vide ne signifie pas que le métal n'est pas contenu dans un équipement, mais que les recherches bibliographiques et les entretiens n'ont permis de récupérer une donnée de composition métallique. Par exemple, il est très probable que les box internet et TV contiennent du gallium, mais leur contenu en gallium n'a pas pu être estimé dans le cadre de cette étude.

Tableau 44 : Nombre de métaux pour lesquels des données de concentration ont été disponibles, par équipement (Deloitte, d'après diverses données)

	Al	Sb	Ag	Be	Bi	Co	Cu	Dy	Sn	Ga	Ge	In	Li	Mg	Mn	Nd	Ni	Au	Pd	Pt	Pr	Ru	Si	Ta	Ti	W	Y	Zn
Téléviseur	x		x				x		x	x		x				x		x	x		x						x	
Smartphone	x		x			x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x
Tablette	x		x			x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x		x			x		x	x	
Ordinateur portable	x		x			x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x			x	
Ecran d'ordinateur	x		x				x		x	x		x					x	x	x				x				x	x
Console de jeux vidéo de salon	x		x			x	x	x	x	x			x			x		x	x	x	x			x			x	
Autre écran	x		x				x		x	x		x					x	x	x				x				x	x
Box TV	x		x				x		x								x	x	x				x					x
Station d'accueil																												
Casque AR-VR	x	x	x			x	x		x			x	x	x			x	x	x					x	x			x
IoT Automatisation	x		x				x			x							x	x									x	
IoT Bâtiment	x		x				x			x							x	x									x	
IoT Passerelle	x		x				x			x							x	x									x	
IoT Sécurité	x		x				x			x							x	x									x	
IoT Capteur	x		x				x			x							x	x									x	
Box internet	x		x				x		x								x	x	x				x					x
Fibre optique											x													x				
Station de base	x	x	x	x			x	x	x	x	x			x		x	x	x	x	x	x		x					x
Serveur	x	x	x	x			x	x	x	x	x			x		x	x	x	x	x	x		x					x
Stockage	x	x				x		x		x	x			x		x	x				x	x		x				
Nombre d'équipements pour lesquels des données étaient disponibles	18	3	16	1	0	6	16	6	11	14	3	12	5	6	1	7	15	16	11	5	7	0	9	5	1	2	12	7

7.5.2. Annexe : Evolution des quantités de métaux utilisés selon différents niveaux de substitution pour chaque variable

Les niveaux de substitution associés à chaque variable sont indiqués dans le Tableau 35 (section 5.1.1.2.1).

Le Tableau 45 compare les **taux de croissance 2020-2050 par métal et par scénario pour chaque niveau de substitution** (hors substitutions, substitution modérée, substitution élevée). Par exemple, pour le scénario S3, les besoins en palladium du numérique augmenteraient de 31 % en l'absence de substitution, de 66 % en cas de substitution modérée et de 84 % en cas de substitution élevée, notamment en raison d'un report d'usage (minime) de l'or vers le palladium.

Les colonnes surlignées en violet correspondent aux métaux pour lesquels **les niveaux de substitution ont un impact non négligeable** sur les besoins en chaque métal à l'horizon 2050.

Tableau 45 : Comparaison des taux de croissance 2020-2050 par métal, par scénario et par niveau de substitution

Scénario	Niveau de substitution	Al	Sb	Ag	Co	Cu	Dy	Sn	Ga	Ge	In	Li	Mg	Mn	Nd	Ni	Au	Pd	Pt	Pr	Si	Ta	W	Y	Zn
Scénario tendanciel	Hors substitution	+123%	+267%	+131%	+34%	+127%	+70%	+37%	+2987%	+370%	+115%	+72%	+33%	+378%	+38%	+153%	+293%	+35%	+76%	+34%	+67%	+59%	+194%	+682%	+137%
	Substitution modérée	+55%	+263%	+131%	+34%	+127%	+60%	+37%	+2978%	+369%	+115%	+72%	+33%	+378%	+29%	+151%	+136%	+69%	+44%	+28%	+67%	+59%	+194%	+682%	+137%
	Substitution élevée	-1%	+261%	+131%	+34%	+127%	+55%	+37%	+2973%	+368%	+115%	+72%	+32%	+378%	+24%	+149%	+57%	+87%	+26%	+25%	+67%	+59%	+194%	+682%	+137%
Scénario S1 Génération frugale	Hors substitution	-49%	+1%	-50%	-50%	-56%	-40%	-64%	-52%	+74%	-70%	-52%	-49%	+32%	-54%	-57%	-47%	-63%	-22%	-59%	-71%	-48%	-9%	+18%	-38%
	Substitution modérée	-67%	-0%	-50%	-50%	-56%	-45%	-64%	-56%	+73%	-70%	-52%	-49%	+32%	-58%	-58%	-68%	-58%	-37%	-62%	-71%	-48%	-9%	+18%	-38%
	Substitution élevée	-80%	-2%	-50%	-50%	-56%	-47%	-64%	-59%	+73%	-70%	-52%	-49%	+32%	-60%	-59%	-79%	-56%	-45%	-63%	-71%	-48%	-9%	+18%	-38%
Scénario S2 Coopérations territoriales	Hors substitution	+14%	+57%	+10%	+5%	+21%	+29%	-22%	+422%	+117%	-3%	+8%	+2%	+138%	+0%	-7%	+39%	-17%	+28%	-4%	-29%	+1%	+77%	+206%	+8%
	Substitution modérée	-23%	+54%	+10%	+5%	+21%	+22%	-22%	+416%	+116%	-3%	+8%	+2%	+138%	-6%	-9%	-16%	-5%	+5%	-8%	-29%	+1%	+77%	+206%	+8%
	Substitution élevée	-52%	+52%	+10%	+5%	+21%	+19%	-22%	+412%	+115%	-3%	+8%	+2%	+138%	-9%	-10%	-44%	+1%	-8%	-10%	-29%	+1%	+77%	+206%	+8%
Scénario S3 Technologies vertes	Hors substitution	+105%	+242%	+131%	+34%	+121%	+59%	+37%	+1233%	+190%	+115%	+72%	+33%	+378%	+34%	+153%	+292%	+31%	+62%	+30%	+67%	+59%	+194%	+681%	+123%
	Substitution modérée	+43%	+239%	+131%	+34%	+121%	+50%	+37%	+1225%	+189%	+115%	+72%	+33%	+378%	+26%	+150%	+135%	+66%	+34%	+25%	+67%	+59%	+194%	+681%	+123%
	Substitution élevée	-8%	+237%	+131%	+34%	+121%	+46%	+37%	+1221%	+188%	+115%	+72%	+32%	+378%	+22%	+149%	+57%	+84%	+18%	+23%	+67%	+59%	+194%	+681%	+123%
Scénario S4 Pari réparateur	Hors substitution	+363%	+446%	+453%	+35%	+291%	+150%	+39%	+4552%	+506%	+408%	+74%	+35%	+412%	+67%	+190%	+1073%	+51%	+180%	+59%	+69%	+59%	+216%	+997%	+236%
	Substitution modérée	+224%	+438%	+453%	+35%	+291%	+132%	+39%	+4534%	+504%	+408%	+74%	+34%	+412%	+50%	+184%	+604%	+156%	+117%	+48%	+69%	+59%	+216%	+997%	+236%
	Substitution élevée	+107%	+434%	+453%	+35%	+291%	+122%	+39%	+4525%	+503%	+408%	+74%	+33%	+412%	+41%	+181%	+369%	+210%	+82%	+42%	+69%	+59%	+216%	+997%	+236%

La Figure 43 représente schématiquement l'effet des trois niveaux de substitutions sur les besoins en métaux (aluminium, dysprosium, néodyme, or, palladium, platine et praséodyme) d'ici à 2050 dans un scénario tendanciel. L'analyse s'applique à ces sept métaux car **ce sont les métaux dont les consommations en 2050 peuvent le plus évoluer en fonction des niveaux de substitution de trois variables à 2050** (Variable #1 Baisse de la concentration en or dans les équipements ; Variable #2 Baisse de l'utilisation d'aluminium dans les équipements ; Variable #3 : Remplacement des dispositifs de stockage HDD par des dispositifs SSD).

Par exemple, alors que l'aluminium est l'un des métaux dont les besoins sont les plus importants (48 940 tonnes en 2020), dans un scénario tendanciel à 2050, la demande en aluminium du secteur du numérique pourrait varier considérablement selon le niveau de substitution appliqué : + 123 % en cas d'absence de substitutions, +55 % en cas de substitution modérée, - 1 % en cas de substitution élevée.

A noter : Alors que, dans un scénario tendanciel hors substitutions, la hausse des besoins en or entre 2020 et 2050 serait élevée, notamment en raison du développement des objets connectés IoT – cf. focus en section 5.1.3.3.5, la variable #1 « Baisse de la concentration en or dans les équipements » permettrait de réduire drastiquement la hausse des besoins en or d'ici à 2050 (+ 57 % contre + 293 %).

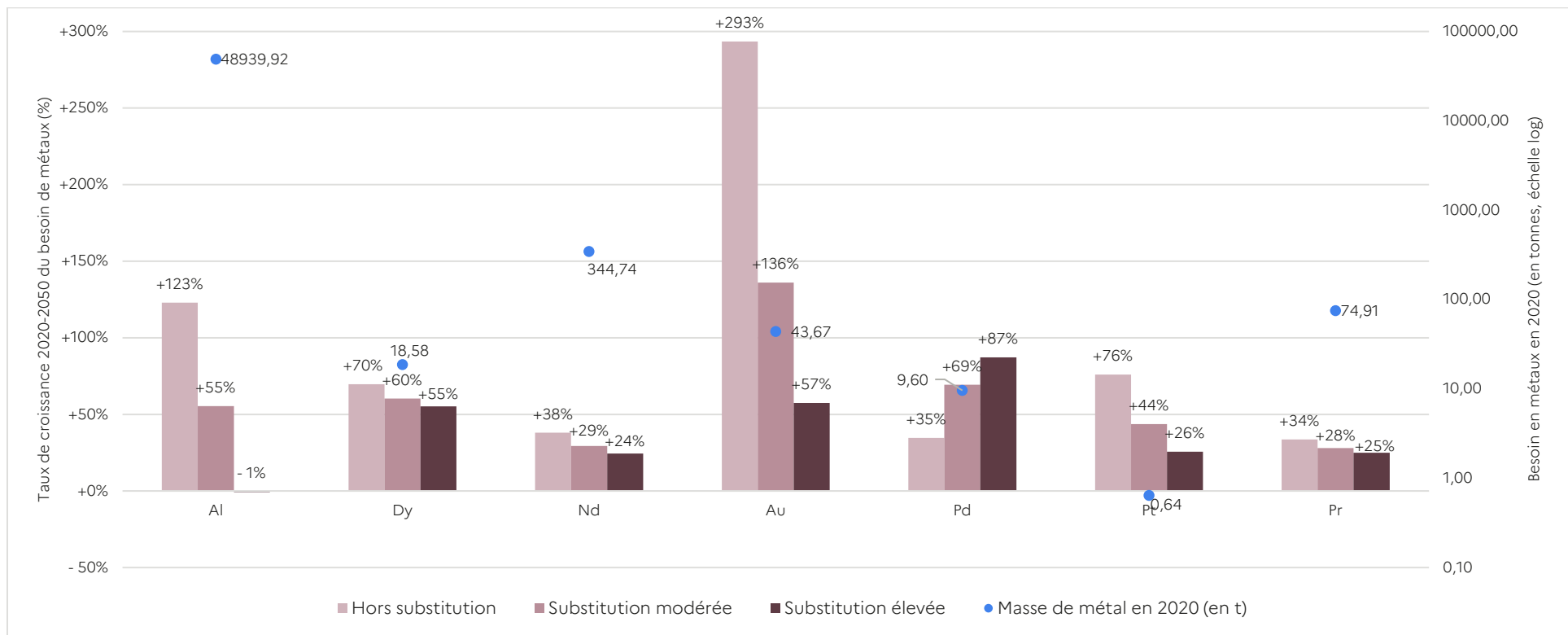


Figure 43 : Taux de croissance 2020-2050 du besoin en sept métaux selon trois niveaux de substitution dans le cadre d'un scénario tendanciel (Deloitte, d'après diverses données)

7.5.3. Annexe : Analyse croisée des taux de croissance et de la criticité des métaux (réserves et disponibilité)

La Figure 44 présente, pour 22 métaux⁹⁵ :

- En abscisses, la somme (sur 10) de deux indicateurs de criticité sur 5 : « Risque sur la longévité des réserves connues » (source : USGS) et « Incertitudes sur la disponibilité du métal » (source : BRGM/OFREMI) ;
- En ordonnées, le taux de croissance des besoins en métaux entre 2020 et 2050 dans un scénario hors substitutions. Ces résultats sont indiqués en section 5.1.2.

Pour rappel, l'analyse prospective (5.1.3.3), à partir des taux de croissance des besoins en métaux, avait permis d'identifier cinq métaux prioritaires, connaissant les plus fortes hausses d'utilisation par le secteur numérique d'ici à 2050 (le gallium, l'yttrium, le manganèse, le germanium et l'or).

En croisant ces données avec les indicateurs de criticité sur les réserves, **sept métaux pourraient être critiques pour le numérique d'ici à 2050** : le germanium, l'étain, le tungstène, le nickel, le zinc, le cuivre et l'argent. Par exemple, les besoins en cuivre du numérique pourraient être compromis par d'importantes « incertitudes sur la disponibilité du métal » (score très élevé de 5/5), alors même que ce métal sera de plus en plus consommé dans le cadre de la double transition numérique et énergétique.

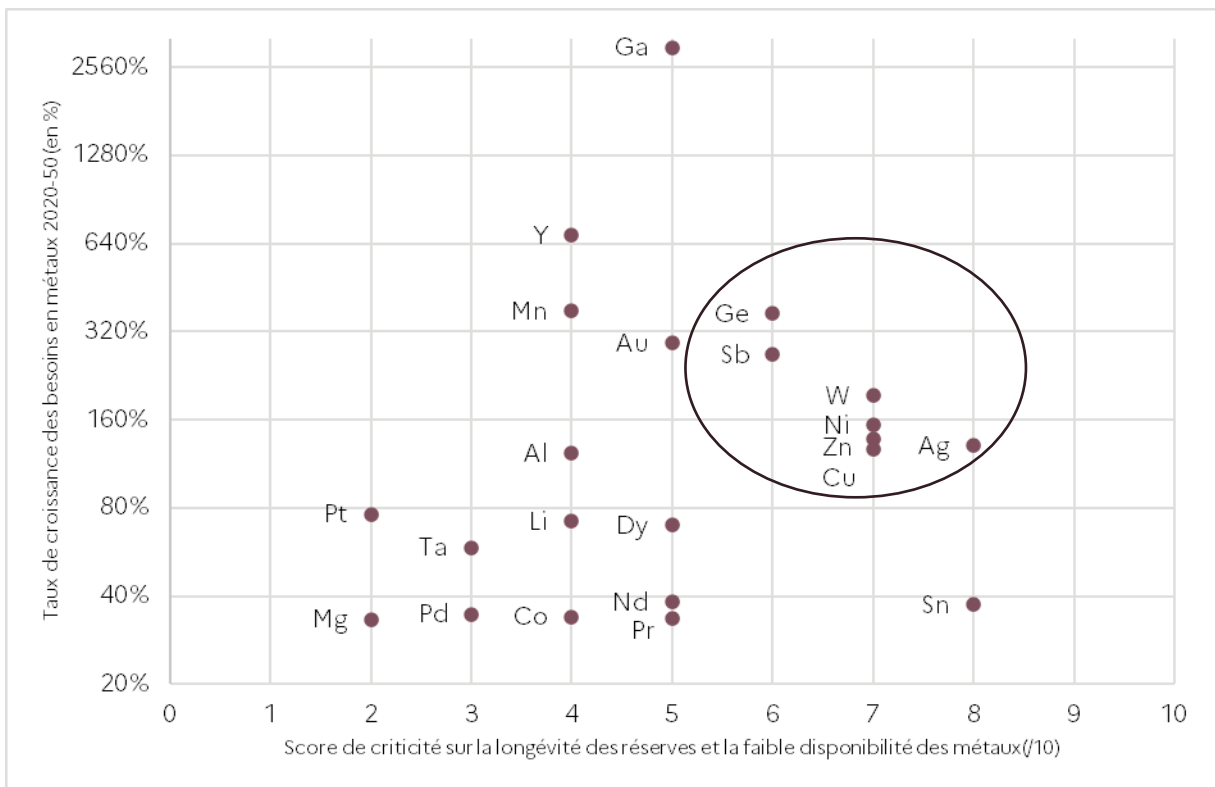


Figure 44 : Analyse croisée des taux de croissance des besoins en métaux 2020-2050 (en %) et des scores de criticité sur les réserves et la disponibilité des métaux (note de 0 à 10)

⁹⁵ Certains indicateurs n'étaient pas disponibles pour le silicium, l'indium et le ruthénium

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



BESOINS EN METAUX DANS LE SECTEUR NUMERIQUE

Cette étude couvre une sélection de 20 équipements du numérique : terminaux fixes et mobiles, biens d'équipements réseau et équipements utilisés en centres de données. Une recherche bibliographique et une série d'entretiens ont permis d'établir la composition matière de ces équipements pour une sélection de 25 métaux. La présente étude cartographie également les chaînes de valeur amont de ces métaux utilisés dans les équipements du secteur numérique, ainsi que le devenir en fin de vie des équipements (collecte, tri, recyclage) en aval des chaînes de valeur. Enfin, une analyse prospective évalue la quantité de métaux utilisées dans le secteur numérique en France aux horizons 2030 et 2050, établie à partir des analyses prospectives de l'étude ADEME/Arcep « Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective ».

Les informations spécifiques aux métaux d'une part, et aux équipements d'autre part, sont présentées dans un jeu de fiches annexées au présent rapport. Ce rapport présente le contexte de l'étude, la méthodologie sélectionnée pour établir les informations des fiches, et une analyse d'ensemble des résultats de l'étude (utilisation des métaux dans le secteur numérique, devenir des métaux en fin de vie des équipements, analyse prospective).

L'ensemble des résultats de l'étude permet d'établir les recommandations suivantes :

- 1. Rendre les chaînes de valeur plus transparentes*
- 2. Mettre en place une stratégie de souveraineté, en tenant compte des possibilités limitées de relocalisation à court et moyen terme des chaînes de valeur*
- 3. Amorcer une réflexion sur la mise en place de bonnes pratiques de sobriété, à la fois sur les usages et sur la conception des équipements.*

