

L'analyse du cycle de vie au service d'une politique responsable de consommation des métaux stratégiques chez Orange

Par Mikko Samuli VAIJA
Analyste Cycle de vie, Orange Labs

Dans le cadre de sa politique environnementale, le groupe Orange mène, depuis 2007, des évaluations des impacts environnementaux de ses produits. Cette stratégie recouvre à la fois les produits vendus directement par Orange, tels que les téléphones mobiles ou les tablettes fabriqués par des industriels tiers, et les produits développés par Orange (Livebox et décodeurs TV, par exemple). Les analyses de cycle de vie (ACV), menées selon les principes des normes ISO 14040-14044, constituent l'outil principal pour la réalisation de ce travail.

Pour les téléphones mobiles, l'ACV a permis le développement d'une méthode d'affichage environnemental (ORANGE, 2015) prenant en compte trois impacts environnementaux : le changement climatique (noté « limitation du CO₂ »), l'épuisement des ressources naturelles (noté « préservation des ressources naturelles ») et l'écoconception du produit (noté « conception écoresponsable »).

Les principes de cette méthode ont été intégrés notamment dans le référentiel de bonnes pratiques édité par le groupe de travail sectoriel - GT2 (ADEME, 2015). En ce qui concerne l'épuisement des ressources naturelles, la méthode initiale de l'affichage environnemental Orange considérait trois métaux (l'or, l'argent et l'étain) pour lesquels les réserves sont signalées comme critiques, notamment dans l'ACV menée pour l'ADEME (JANIN, 2008). La réalisation de plusieurs ACV en interne, notamment pour la Commission européenne (ANDRAE et VAIJA, 2014), a conduit à inscrire dans cette liste l'indium et le tantale.

Analyse de cycle de vie, épuisement des ressources naturelles et contenus en matériaux

La méthode d'ACV a pour but de fournir des résultats sur les impacts environnementaux inhérents au cycle de vie d'un produit, d'un réseau ou d'un service. Pour l'épuisement des ressources naturelles, cet impact environnemental peut être traduit en surplus d'énergie nécessaire pour l'extraction (modèle Impact 2002+, par exemple), en kilogrammes d'élément équivalent (l'antimoine, par

exemple, dans le modèle CML2002) ou encore en fraction de réserve par personne (modèle EPS2000, par exemple). Le choix du modèle influera également sur les résultats en fonction de la prise en compte ou non de certains éléments (KLINGLMAIR, SALA et BRANDAO, 2013).

Suite à la publication de recommandations par la Commission européenne (Joint Research Center, 2012), Orange a décidé d'appliquer la méthode CML2002 (VAN OERS, de KONING, GUINNE et HUPPES, 2002). Ce modèle inclut 74 flux élémentaires ⁽¹⁾ différents, dont le germanium, l'indium, les platinoïdes ou les terres rares, tous considérés comme critiques par la Commission européenne (European Commission, 2014). Le modèle CML2002 prend également en compte les réserves de ressources énergétiques fossiles comme le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Pour chacun des flux, un facteur de caractérisation (noté *ADPi*) est calculé selon l'équation :

$$ADPi = \frac{\frac{DRi}{(Ri)^2}}{\frac{DRantimoine}{(Rantimoine)^2}}$$

Dans laquelle *DRi* représente le taux d'extraction de l'élément *i* exprimé en kg/année et *Ri* les réserves de l'élé-

(1) Dénomination en ACV des intrants/sortants dans l'inventaire du cycle de vie (ICV). Dans le cas de CML2002, les flux sont équivalents à des ressources naturelles prélevées dans le milieu naturel.

ment i exprimées en kg. $DR_{antimoine}$ et $R_{antimoine}$ étant les équivalents de R_i et DR_i pour l'antimoine. Plus le facteur de caractérisation ADP_i est grand, plus l'élément i est considéré comme rare. Ainsi, le facteur ADP du germanium est égal à $1,95E+4$, alors que celui du fer n'est que de $1,66E-6$.

Le modèle CML2002 comporte deux méthodes principales pour calculer les réserves de ressources :

- *Ultimate reserves* : calcul en fonction de l'abondance des éléments dans la croûte terrestre,
- *Reserve base* : calcul en fonction des quantités qui se conforment à des critères physiques et chimiques minimaux liés à l'industrie minière (par exemple, la richesse du minerai) à un moment donné.

Chacune de ces méthodes est donc intrinsèquement liée à un horizon temporel. Ainsi, pour l'or, les réserves disponibles se montent à environ $3,49E+1$ années d'extraction avec la méthode *Reserve base*, contre $3,04E+07$ années en choisissant la méthode *Ultimate reserves*.

La distribution des ressources dans la croûte terrestre est également un élément à prendre en considération pour le choix de la méthode. Pour les ressources rares (*minor elements* - comme l'argent, le platine, l'indium et le cuivre), une grande partie des réserves présentes dans la croûte terrestre est très diffuse. La Figure 1 ci-dessous présente cette distribution telle que l'a définie B. Skinner.

Pour une exploitation au-delà de la limite d'exploitabilité du minerai (*mineralogical barrier*), les coûts d'exploitation (notamment ceux liés aux dépenses d'énergie) augmentent de façon exponentielle. Les réserves de ressources stratégiques disponibles pour l'industrie apparaissent donc comme beaucoup plus limitées que celles accessibles avec la méthode d'estimation *Ultimate reserves*.

La combinaison « échelle de temps + distribution des ressources rares » a ainsi conduit Orange à faire le choix

de la méthode *Reserve base*. Celle-ci est également recommandée dans la note technique du JRC (Joint Research Center, 2012).

Lors de la réalisation d'une analyse de cycle de vie (hormis le choix du couple méthode CML2002/méthode *Reserve base*), les données utilisées vont grandement influencer les résultats. En effet, les logiciels d'ACV (tels que Simapro, EIME ou Gabi) reposent sur des bases de données (Ecoinvent, par exemple) qui contiennent des milliers de modèles (également appelés modules). Ces derniers peuvent servir à calculer les impacts environnementaux de la production d'un kilogramme d'acier inoxydable, d'un trajet d'un kilomètre en voiture, ou encore la consommation d'un kilowattheure d'électricité sur le réseau domestique français.

Les modules contenus dans les bases d'ACV sont développés à partir de données industrielles pour un composant donné ou une moyenne de composants disponibles sur le marché à une date donnée. De ce fait, les matériaux pris en compte dans ces modules sont rarement exhaustifs, surtout pour des composants de secteurs fortement innovants

Known inputs from technosphere (materials/fuels)	
Name	
Electronic component factory {GLO} market for Alloc Def, U	
Silver {GLO} market for Alloc Def, U	
Copper {GLO} market for Alloc Def, U	
Lead {GLO} market for Alloc Def, U	
Tin {GLO} market for Alloc Def, U	
Zinc {GLO} market for Alloc Def, U	
Epoxy resin, liquid {GLO} market for Alloc Def, U	
Gold {GLO} market for Alloc Def, U	

Figure 2 : Exemples de matériaux pris en compte pour la production d'un circuit intégré (Ecoinvent - V3.0.25, 2010).

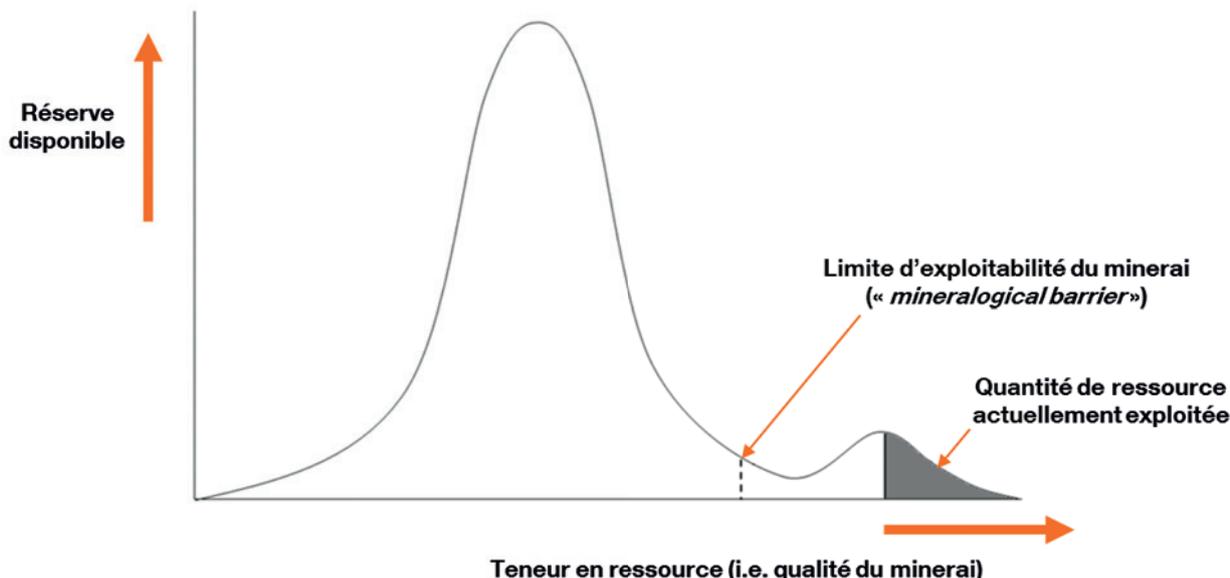


Figure 1 : Distribution des réserves de ressources rares (SKINNER, 2001).

Sub-assembly	Sub-assembly mass (mg)	Item	Item material	Material CAS Number	Item mass (mg)
Silicon Die	2,074	Silicon Die	Silicon (Si)	7440-21-3	2,002
Silicon Die		metallization	Aluminium (Al)	7429-90-5	0,016
Silicon Die		metallization	Tungsten (W)	7440-33-7	0,013
Silicon Die		passivation	Silicon Nitride (SiN)	68034-42-4	0,003
Silicon Die		passivation	Silicon Oxide(SiO ₂)	7631-86-9	0,027
Silicon Die		passivation	Gamma-butyrolactone	96-48-0	0,009
Silicon Die		passivation	Polyhydroxyamide	55295-98-2	0,004
Lead-frame	15,987	alloy	Copper (Cu)	7440-50-8	15,332
Lead-frame		alloy	Iron (Fe)	7439-89-6	0,37
Lead-frame		alloy	Phosphorus (P)	7723-14-0	0,005
Lead-frame		alloy	Zinc (Zn)	7440-66-6	0,019
Lead-frame		metallization	Nickel (Ni)	7440-02-0	0,255
Lead-frame		metallization	Palladium (Pd)	7440-05-3	0,005
Lead-frame		metallization	Gold (Au)	7440-57-5	0,001
Bonding wire	0,164	wire	Gold (Au)	7440-57-5	0,164

Tableau 1 : Extrait d'une déclaration de matériaux (L6924D013TR – STMicroelectronics).

comme celui de la microélectronique. Ainsi, le composant modélisé dans la Figure 2 de la page précédente n'est plus représentatif du marché. En effet, la mise en place de la directive RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) a contraint les industriels à réduire fortement la concentration en plomb de leurs composants. La crème à braser de type étain-plomb a, par exemple, été remplacée par un alliage étain-argent-cuivre dans la majorité des produits.

L'envolée des cours des matières premières a également joué sur la composition des circuits intégrés, avec le remplacement de l'or par du cuivre ou de l'aluminium dans les fils de câblage (*wire bonding*). De ce fait, l'utilisation directe de modules issus de bases de données ACV n'est pas possible pour évaluer finement le contenu en matériaux d'un produit.

La prise en compte de données fournisseurs

Afin de pallier au manque de précision des logiciels d'ACV, Orange a eu directement recours à des données fournisseurs pour reconstituer le contenu des composants électroniques de plusieurs types de téléphones portables et de cartes réseaux. Depuis la mise en place de la directive RoHS, ces fiches dites de déclaration de matériaux (également appelées *Materials Declaration* ou *Materials Declaration Sheet* en anglais) sont notamment régies par les standards de la famille IPC-175X (IPC, 2015) et IEC 62474 (IEC, 2015).

Le Tableau 1 ci-dessus présente (par ordre de poids décroissants en milligrammes) les 15 premiers éléments (sur un total de 25) contenus dans un composant STMicroelectronics dédié à la gestion des cellules Li-ions (STMicroelectronics, 2015). Ce document permet ainsi d'évaluer rapidement la quantité de ressources rares, comme le palladium (0,005 mg) ou l'or (0,165 mg), que celles-ci renferment. Il est à noter que ce composant contient aussi d'autres ressources rares (comme l'argent), mais que celles-ci ne figurent pas dans les lignes présentées dans le Tableau 1.

Dans le cas des produits électroniques complexes comme les *smartphones* ou les cartes réseaux, l'architecture nécessite de recueillir un grand nombre de ces fiches pour obtenir une complétude satisfaisante des données. La Figure 3 de la page suivante présente quelques exemples de sous-ensembles à identifier.

Un *smartphone* haut de gamme peut ainsi compter plus d'une centaine de circuits intégrés, avec un mélange de composants très simples, comme les régulateurs de tension LDO (*Low-dropout regulators*) d'une taille d'un millimètre carré, et de processeurs applicatifs dotés de 6 (voire 8) cœurs. Ces composants sont cependant facilement identifiables, de par la présence sur chacun d'eux d'un numéro de série et du logo du constructeur.

Le problème du recueil de données pour un *smartphone* réside plus dans les composants passifs (condensateurs, inductances et résistances), ainsi que dans les éléments électromécaniques (comme les embases pour cartes SIM/micro-SD ou les connecteurs micro-USB/audio). En effet, il est rare que ces éléments soient marqués, principalement du fait de leur taille (un composant passif de classe 01005 mesure 0,4 x 0,2 mm). S'il est ainsi possible de reconnaître les différents types de composants (voir la Figure 4 de la page suivante), il est en revanche quasi impossible d'en retrouver la référence exacte ou le fabricant.

Pour ces composants, lorsque de grandes disparités de composition étaient avérées, Orange a choisi de recueillir des déclarations matières chez plusieurs fabricants et de créer deux composants de référence : un premier, conçu sur une base de métaux nobles (par exemple, les condensateurs céramiques dotés d'électrodes internes en alliage argent-palladium), et, un second, conçu sur une base de métaux plus communs (comme le cuivre ou le nickel pour les condensateurs céramiques), le but recherché étant de pouvoir donner pour un produit complet une estimation de son contenu en ressources rares. Ainsi, 61 composants ont été listés dans l'outil créé à cet effet.

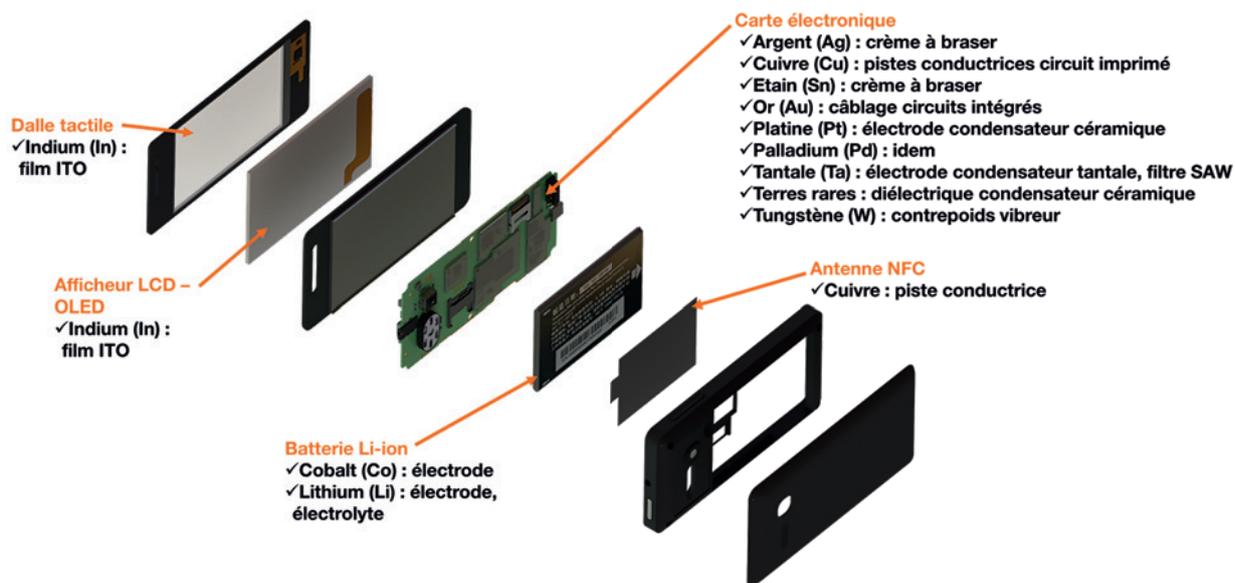


Figure 3 : Exemples de ressources rares contenues dans un *smartphone* et de leurs usages (VAIJA, 2015).

Le besoin de disposer d'appareils de mesure complémentaires

Les produits électroniques étudiés par Orange comportent également des éléments mécaniques dont il est intéressant d'évaluer la composition. Si les pièces de grandes dimensions sont le plus souvent marquées (par exemple, dans les *smartphones* haut de gamme, le châssis est parfois réalisé en alliage de magnésium AZ91), il est difficile d'évaluer la nature des traitements de surface (par exemple, un dépôt de type ENIG - *Electroless Nickel Immersion Gold* - sur les circuits imprimés) et de déterminer la composition d'éléments comme les broches de contact des puces électroniques.

Afin de pallier ce problème, Orange s'est équipé d'un spectromètre de fluorescence X (ou XRF, pour *X-ray*

fluorescence). Cet appareil permet d'obtenir la composition d'une pièce sous la forme d'un spectre. La Figure 5 de la page suivante présente les résultats obtenus pour des lames de contact conçues à partir d'un alliage de fer-nickel (identifiés par les 3 premiers pics en partant de la gauche) recouvert par deux traitements de surface (en cuivre et en argent : les deux pics le plus à droite, dans cette même Figure).

L'usage de cet appareil nécessite cependant un démontage complet du produit étudié pour pouvoir analyser chaque élément individuellement. De plus, l'appareil n'est pas en mesure de différencier les éléments déposés lors d'un traitement de surface de ceux qui constituent la pièce elle-même. Ainsi, par exemple, pour les lames de contact présentées dans la Figure 5, il revient à l'analyste de comprendre que l'argent ne représente qu'une fine couche en surface.

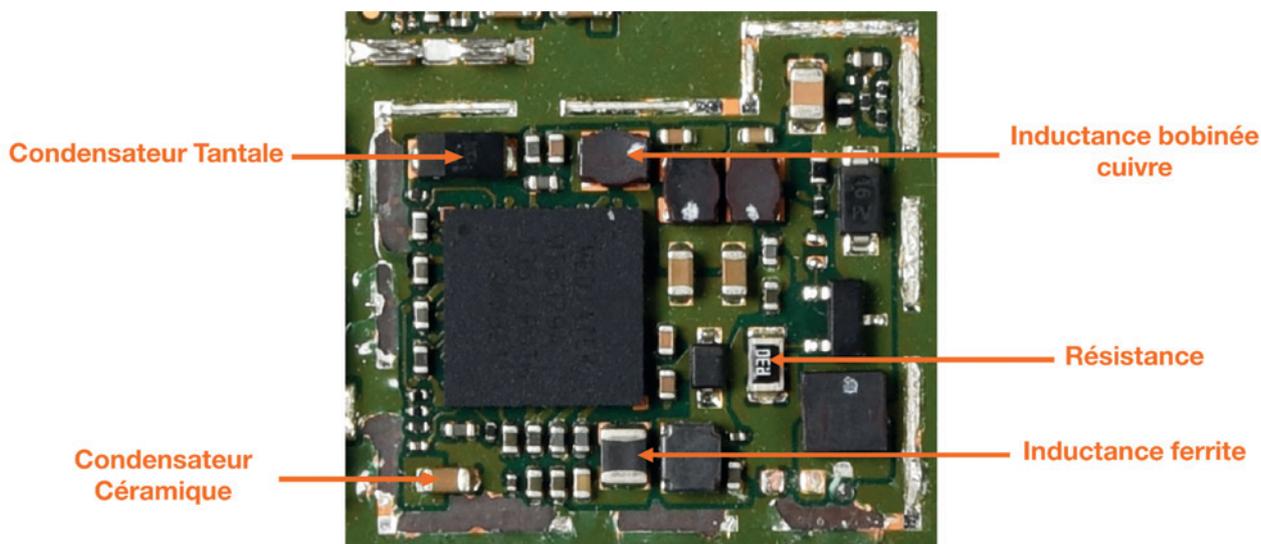


Figure 4 : Exemples de composants passifs sur une carte électronique de *smartphone* (LATARGEZ et VAIJA, 2015).

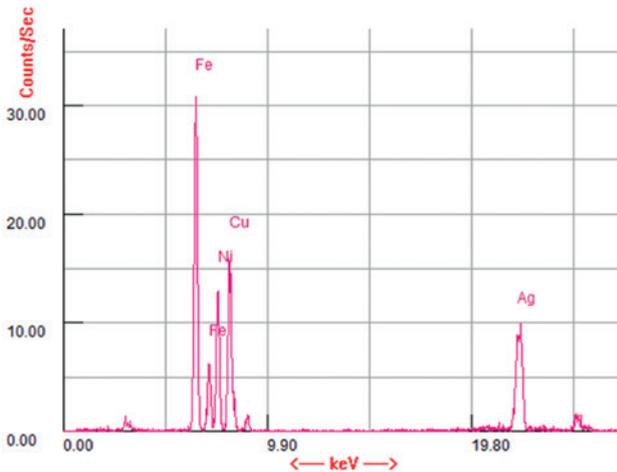


Figure 5 : Résultat d'analyse XRF pour des lames de contact d'un smartphone.

La synthèse des données recueillies

La combinaison des déclarations de matériaux (pour les composants électroniques) et les résultats obtenus par l'analyse XRF de ceux-ci permet d'obtenir une meilleure connaissance du contenu en ressources rares des produits. Dans le cadre de l'affichage environnemental des téléphones mobiles, l'obtention de données sur leur contenu potentiel en indium et en tantale a permis de confirmer la liste des ressources critiques à suivre. En effet, pour les deux téléphones mobiles analysés (voir les résultats de la Figure 6 ci-dessous), l'indium est le premier contributeur à l'impact sur l'épuisement des ressources naturelles (en appliquant la méthode détaillée précédemment et selon CML2002 - *Reserve Base*). Pour les produits équipés de condensateurs tantale (comme le smartphone haut de gamme, dans cet exemple), la contribution du tantale est également significative. Le téléphone mobile d'entrée de gamme n'étant pas équipé de ce type de composant, la quantité de tantale qu'il renferme est très peu significative. En effet, seule la céramique en tantalate de lithium (Li-TaO₃) des filtres piézoélectriques (ou filtres SAW, pour *Surface Acoustic Wave*) en contient quelques milligrammes, contre près de 100 mg pour les condensateurs au tantale des smartphones.

Évolutions méthodologiques

La méthode présentée précédemment a pour vocation d'évoluer sur deux axes.

La première évolution réside dans la prise en compte des nouvelles technologies implémentées par les industriels. Si la substitution dans les fils de câblage de l'or par du cuivre peut être évaluée composant par composant en accédant à la déclaration de matériaux, l'évaluation est plus problématique pour d'autres innovations.

Ainsi, la production d'un écran basé sur une matrice active de diodes électroluminescentes organiques (ou AMOLED) a recours à des ressources rares. Par exemple, les matériaux pour le dopage rouge nécessitent de l'iridium (contenu dans le *Tris(1-phenyl-isoquinoline)iridium(III)*) et ceux servant au transport des électrons peuvent être basés sur des produits contenant de l'indium (comme le *Tris(8-hydroxy-quinolino)indium*). Mais étant donné les forts intérêts stratégiques en jeu sur le marché des écrans de ce type, il n'a (pour l'instant) pas été possible d'obtenir de déclaration de matériaux pour ces équipements.

Le remplacement de l'indium dans les écrans est également d'actualité, comme cela a été souligné au cours du *SID Display Week* qui s'est tenu à San Jose (en Californie) en juin 2015 (PERRET, 2015).

Plusieurs technologies, comme les nanofils d'argent ou les nanotubes de carbone, sont actuellement étudiées pour remplacer les fils ITO (oxyde d'indium-étain) dans les afficheurs LCD et OLED, ainsi que dans les dalles tactiles. Toute la difficulté, pour Orange, sera de suivre cette évolution technologique et de mettre en place des partenariats industriels pour lui permettre d'évaluer les quantités de ressources rares embarquées dans ces innovations technologiques.

La seconde évolution se situe au niveau de la méthode d'évaluation CML2002. En effet, celle-ci n'intègre pas un point clé, les stocks de métaux d'origine anthropique. Ainsi, selon les données de l'USGS de 2012, les banques centrales détenaient 30 100 tonnes d'or, soit une quantité correspondant à plus de 10 ans d'extraction. Se présentant de surcroît sous la forme de lingots de matière pure, l'or des réserves bancaires peut être directement utilisé pour la production, notamment des éléments électroniques. La méthode AADP - *anthropogenic stock extended abiotic depletion potential* (SCHNEIDER, BERGER et FINKBEINER, 2011) modifie la formule de calcul des facteurs ADP (voir l'Équation de la page 99) en y intégrant les stocks anthropogènes : le facteur R_i représente alors la somme des réserves de l'élément i et de ses stocks anthropogènes (il en va de même pour $R_{\text{antimoine}}$).

Smartphone haut de gamme	
Element	Contribution épuisement des ressources - Méthode CML2002 - <i>Reserve base</i>
indium (In)	41,76 %
argent (Ag)	20,97 %
or (Au)	18,06 %
tantale (Ta)	8,00 %
étain (Sn)	4,04 %

Téléphone mobile d'entrée de gamme	
Element	Contribution épuisement des ressources - Méthode CML2002 - <i>Reserve base</i>
indium (In)	31,67 %
argent (Ag)	28,87 %
or (Au)	17,26 %
étain (Sn)	7,25 %
palladium (Pd)	5,66 %

Figure 6 : Liste des 5 éléments les plus contributeurs à l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles (VAIJA, 2015).

Bibliographie

ADEME (2015), *Étiquetage environnemental* (<http://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/reconnaitre-produit-plus-respectueux-lenvironnement/dossier/affichage-environnemental/affichage-environnemental-contexte-reglementaire-objectifs>).

ANDRAE (A. S.) & VAIJA (M. S.), *To Which Degree Does Sector Specific Standardization Make Life Cycle Assessments Comparable? - The Case of Global Warming Potential of Smartphones*, 2014.

Ecoinvent - V3.0.25, *Integrated circuit logic type {GLO} - production - Alloc Déf, U*, 2010.

European Commission, *Report on critical raw materials for the EU - Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials*, 2014.

IEC (2015), *IEC 62474, Material Declaration for Products of and for the Electrotechnical Industry* (International Electrotechnical Commission : <http://std.iec.ch/iec62474/iec62474.nsf/MainFrameset>).

IPC (2015), *Data Exchange Standards* (IPC - Association Connecting Electronics Industries : <http://www.ipc.org/ContentPage.aspx?pageid=Materials-Declaration>).

JANIN (M.), *Analyse du cycle de vie d'un téléphone portable*, 2008.

Joint Research Center, *Characterisation factors of the ILCD - Recommended Life Cycle Impact Assessment methods*, European Commission, 2012.

KLINGLMAIR (M.), SALA (S.) & BRANDAO (M.), "Assessing resource depletion in LCA: a review of methods", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013.

LATARGEZ (P.) & VAIJA (M.), *Composants passifs montés en surface sur carte électronique de smartphone*, 2015.

ORANGE (2015), *Orange France - Étiquetage environnemental* (http://orange-en-france.orange.fr/developpement_durable/etiquetage_ecologique.html).

PERRET (P.), *SID Display Week - Ecoterm report*, 2015.

SCHNEIDER (L.), BERGER (M.) & FINKBEINER (M.), "The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterization to model the depletion of abiotic resources", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011.

SKINNER (B.), *Exploring the resource base*, 2001.

STMicronics. (2015), *L6924D Single Cell Li Ion battery Charger - PDF format material declaration* (http://www.st.com/stonline/stappl/productcatalog/jsp/unzipFiles.jsp?zipLink=http://www.st.com//stonline/md/dm00088309/L6924D013TR_md.zip&fileType=pdf&fileName=L6924D013TR).

VAIJA (M. S.), *Ressources rares et TIC : méthodes d'évaluation*, Orange, 2015.

VAN OERS (L.), DE KONING (A.), GUINNE (J.) & HUPPES (J.), *Abiotic Resource Depletion in LCA - Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook*, 2002.