

L'importance des métaux rares pour le secteur des technologies de l'information et de la communication, le cas d'Orange

Par Samuli VAIJA

Analyse cycle de vie et économie circulaire, Orange

Et Éric PHILIPOT

Conseiller environnement

Depuis 2016, avec l'intégration de l'économie circulaire dans ses processus, Orange a lancé plusieurs projets pour améliorer ses connaissances dans le domaine des matériaux. Ainsi, la réalisation par le Groupe d'analyses de cycle de vie à visée d'identification des matériaux ayant le plus fort impact environnemental a été étendue aux équipements réseaux afin de renforcer en interne les connaissances sur ce sujet. Une mise à jour de la cartographie d'exposition du Groupe aux matériaux critiques a été lancée en 2018 pour couvrir les nouvelles technologies qui nécessitent potentiellement des matériaux spécifiques. Enfin, Orange s'est engagé dans les travaux de standardisation, dans le domaine de l'efficacité matière, qui se déroulent, par exemple, à l'ADEME ou à l'ITU-T, afin de pouvoir travailler sur la rédaction de l'état de l'art des exigences d'efficacité matière et ainsi les intégrer dans ses processus d'achat.

Introduction

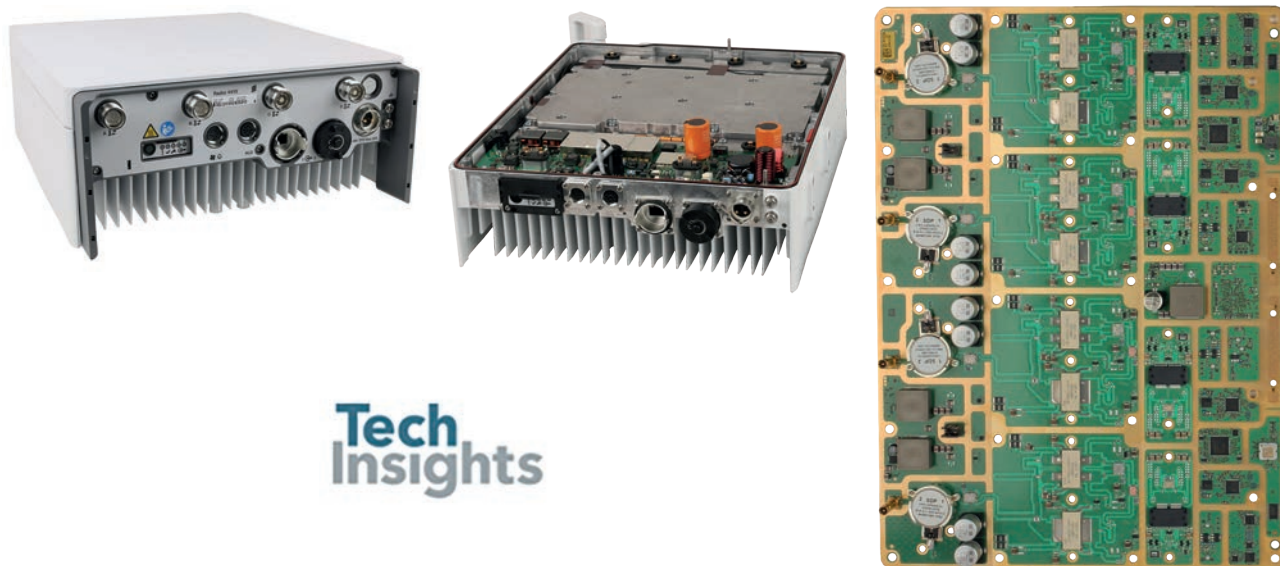
La prise en compte de la problématique matériaux a été intégrée par Orange dès le lancement de l'affichage environnemental pour les téléphones mobiles en 2007 et s'est poursuivie grâce à la montée en compétence des acteurs du Groupe sur les thématiques d'analyse de cycle de vie. Aujourd'hui, Orange est un acteur qui est présent dans les différentes instances travaillant sur les axes de l'efficacité matière, comme l'ADEME avec l'indicateur de réparabilité ou l'ITU-T avec l'indicateur de circularité. Ces efforts ont ainsi permis de développer de nouvelles méthodes et d'étendre le périmètre aux équipements du réseau.

Équipements réseaux et évaluation de l'impact matière

À ce niveau, l'évaluation de l'utilisation des matières premières est réalisée selon la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) afin d'identifier les matériaux les plus critiques en termes d'épuisement des ressources naturelles, selon l'indicateur Abiotic Resources Depletion (ARD – Oers, Koning, Guinée et Huppés, 2002). Cet indicateur mesure la consommation de ressources minérales (or, argent, étain...) et de ressources énergétiques fossiles (charbon, gaz naturel...) sur l'intégralité du cycle de vie de

l'équipement (extraction des ressources, production de l'équipement, transport, utilisation et fin de vie).

Afin de réaliser une ACV et ainsi obtenir des résultats pertinents pour l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles, il est souvent nécessaire de démonter totalement un équipement, jusqu'au niveau composant (par exemple, en désolidarisant les circuits intégrés du circuit imprimé pour pouvoir les peser). Ces opérations de démontage rendent l'équipement totalement inopérant. Ainsi, afin d'éviter de détruire un équipement et pour faciliter le partage et la réutilisation d'informations, il a été décidé d'utiliser les données fournies par le cabinet TechInsights pour réaliser l'analyse d'une unité radio distante (également appelée RRU ou *Remote Radio Unit*) de quatrième génération (réseau mobile 4G ou LTE). TechInsights réalise des analyses technico-économiques, par exemple pour évaluer le coût de fabrication de différents composants et matériaux. Ces données sont un très bon point de départ pour réaliser une ACV. En effet, TechInsights identifie les différents composants en présence, comme le nombre de circuits intégrés, les fabricants de ces composants ou encore le type de boîtier (par exemple, la matrice de billes ou BGA – *Ball Grid Array*). La Figure 1 de la page suivante présente plusieurs vues du démontage d'une unité radio distante 4G.



Tech
Insights

Figure 1 : Vue de face de l'unité radio distante (photo de gauche), vue de l'unité radio partiellement démontée avec la partie alimentation visible (photo centrale) et vue de la carte de transmission démontée (photo de droite) (source : Teardown TechInsights).

La modélisation d'un type d'équipement est un exercice complexe, notamment en présence d'un modèle final comportant environ 1 500 entrées différentes pour les matériaux (comme l'aluminium, le cuivre, l'étain...), les processus industriels (par exemple, l'injection de thermoplastique, extrusion d'aluminium) ou les composants électroniques (les circuits intégrés, les condensateurs céramiques montés en surface...). Toutes ces données sont renseignées dans un logiciel dédié d'ACV – EIME® –, fourni par LCIE Bureau Veritas.

Nous nous concentrons ici sur l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles, ce qui nécessite de porter une attention particulière à la modélisation des composants électroniques. L'unité radio comporte 8 transistors de puissance de type LDMOS (transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semi-conducteur à double diffusion latérale ou *laterally diffused metal oxide semiconductor*), nécessaires pour transformer un signal radio de faible puissance en un signal de forte puissance. Un exemple de ce type de composant est présenté dans la Figure 2 ci-dessus.



Figure 2 : Transistor LDMOS (source : Ampleon).

Il n'existe pas à ce jour de modèle générique permettant de représenter un transistor de puissance LDMOS dans la base de données du logiciel d'ACV. Cependant, le fournisseur du composant (Ampleon) met à disposition des

fiches de déclaration matières (*Full Materials Declarations*). Celles-ci décrivent en détail l'intégralité du contenu en matériaux (voir la Figure 3 de la page suivante, pour un aperçu de 5 matériaux présents dans le transistor, sur un total de 19).

Pour tous les composants non présents dans la base de données du logiciel d'ACV, un procédé similaire de collecte des déclarations matières est mis en place. Cela permet d'affiner autant que faire se peut la connaissance sur le contenu en matériaux. Une fois l'intégralité des matériaux, procédés industriels et composants identifiés, la saisie est réalisée dans l'outil d'ACV. Les résultats d'impacts environnementaux sont ensuite calculés selon le set d'indicateurs ILCD – *Level I & II recommended indicator*. En ce qui concerne l'épuisement des ressources naturelles, la méthode de calcul utilisée est nommée Abiotic Resources Depletion (ARD), elle est développée par l'Institute of Environmental Sciences (CML, 2016) de l'Université de Leiden. Cette méthode, dans sa version « Réserves de base » retenue pour notre analyse, considère les stocks de ressources disponibles comme une « concentration ou occurrence d'un matériel solide d'intérêt économique dans ou sur la croûte terrestre dans une forme telle – en qualité et quantité – qu'il existe des prospections raisonnables pour une éventuelle extraction économique » (Pradel, Garcia et Vajja, 2019).

La Figure 4 de la page suivante présente la contribution d'une sélection de matériaux à l'obtention de l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles (ARD). Il est à noter que les 5 matériaux suivants représentent plus de 95 % de l'impact :

- l'or (Au), utilisé notamment en tant que finition de surface sur la carte de transmission (voir la Figure 1, photo de droite) ou pour le câblage par fil à l'intérieur des circuits intégrés,
- l'étain (Sn) et l'argent (Ag), notamment présents dans l'alliage utilisé pour réaliser les brasures (permettant l'as-

Header	Pure metal layer					
		Palladium (Pd)	7440-05-3	2.352	0.050	0.040
		Gold (Au)	7440-57-5	0.000	0.000	0.000
		Silver (Ag)	7440-22-4	16.931	0.360	0.286
	Copper alloy	Phosphorous (P)	7723-14-0	1.411	0.030	0.024
		Iron (Fe)	7439-89-6	4.703	0.100	0.079
		Copper (Cu)	7440-50-8	4677.134	99.450	78.993
		<i>Subtotal</i>		<i>4702.531</i>	<i>99.990</i>	<i>79.422</i>

Figure 3 : Transistor de puissance LDMOS – Extrait de la déclaration matières (source : Ampleon).

semblage des composants électroniques sur le circuit imprimé),

- le cuivre (Cu), présent en quantité significative dans les pistes conductrices des circuits imprimés. Pour les cartes de transmission, de réception et de contrôle, les circuits imprimés comportent tous 14 couches de cuivre,
- le molybdène (Mo), utilisé en alliage avec du cuivre (Cu) dans les LDMOS transistors afin d'assurer le refroidissement de ces composants.

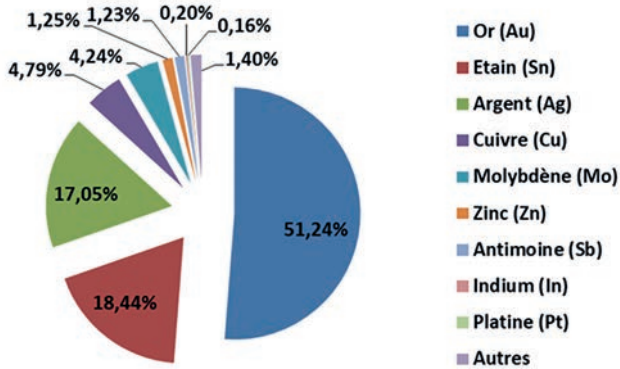


Figure 4 : Contribution des différents matériaux à l'élaboration de l'indicateur ARD (source : Orange Travaux OLN/GDM).

Concernant les équipements 5G, l'analyse est en cours. En termes d'épuisement des ressources naturelles, des matériaux comme l'or, l'argent, l'étain ou le cuivre seront sans aucun doute présents en quantités significatives pour représenter une part conséquente de l'impact. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux, comme le gallium sous forme de nitrure de gallium pour remplacer le silicium dans les transistors LDMOS afin d'améliorer l'efficacité de l'amplification de puissance, pourrait modifier la répartition des impacts entre les différents matériaux. Dans le cas du gallium, qui est majoritairement un coproduit du raffinage de la bauxite pour en extraire l'alumine (Mineralinfo, 2016), la disponibilité dépend plus des capacités d'extraction de la bauxite et de la quantité récupérée en tant que coproduit (toutes les installations de raffinage de bauxite ne permettent pas d'extraire du gallium). Dans la méthode d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles ARD en version « Réserves de base », cela se traduit par un facteur de caractérisation relativement faible ($6,30 \cdot 10^{-3}$ kg équivalent antimoine par kg de gallium, contre, par exemple, $3,60 \cdot 10^1$ kg équivalent antimoine par kg pour l'or).

Mise à jour de la cartographie d'Orange sur les matériaux critiques

En 2012, Orange a initié une première série de travaux sur l'exposition de l'entreprise à la problématique des matériaux critiques. L'analyse a été réalisée par le cabinet Carbone4 sur la base d'inventaires d'ACV menées par Orange Labs. Les paramètres suivants ont été pris en compte pour classer, ou non, les matériaux comme critiques pour Orange :

- importance économique de ces matériaux pour le Groupe,
- leur substituabilité,
- la volatilité de leur prix,
- l'évolution historique de leur prix,
- leur taux de recyclage,
- la concentration géographique de leurs dépôts.

Au cours de travaux ultérieurs, il a cependant été démontré que les inventaires issus de ces ACV n'étaient ni suffisamment exhaustifs pour prendre en compte l'intégralité des matériaux présents dans les produits électroniques, ni suffisamment à jour pour représenter les technologies de produits actuellement sur le marché (Vaija, 2016).

En 2018, des études complémentaires ont été lancées sur la criticité des ressources au sein de l'entité GDM (Green transformation, Data knowledge, traffic & resources Modelling, entité d'Orange Labs Networks), notamment pour couvrir l'aspect Matériaux présents dans les infrastructures réseaux. Un premier volet consacré à la recherche bibliographique a permis de recenser les critères utilisés pour identifier les matériaux critiques présents dans les équipements du secteur des télécommunications.

Il est par exemple intéressant de souligner que de nombreux travaux de recherche sont actuellement menés afin d'intégrer le concept de criticité dans les ACV. Une approche fait consensus dans l'évaluation de cette criticité du fait qu'elle prend en compte des sous-indicateurs géologiques et géopolitiques pour caractériser le risque d'approvisionnement. Sont notamment retenus des sous-indicateurs comme l'importance économique et la substituabilité pour définir la vulnérabilité d'un pays ou d'un secteur d'activité vis-à-vis d'une ressource (Pradel, Garcia et Vaija, 2019). Un matériau est considéré comme critique au regard de son importance économique et du risque qui pèse sur son approvisionnement. La mesure

du risque économique provenant des utilisations du matériau concerné – cela inclut les différentes étapes de production, d'utilisation et de fin de vie –, pour un utilisateur spécifique sur une certaine période de temps, définit sa criticité.

La majorité de ces matériaux sont très faiblement substituables ou alors au détriment de leurs performances. La substitution nécessite parfois de recourir à un matériau tout aussi, si ce n'est plus, critique. Cela va également de pair avec un taux de recyclage faible, souvent dû à un coût plus élevé que celui de l'extraction primaire du matériau ou aux faibles quantités disponibles pour le recyclage (Deloitte, BGS, BRGM & TNO, 2017).

Un indice de criticité a été développé reposant sur cinq métriques pour chacun des matériaux précités :

- les années de réserves, noté YR dans l'équation ci-dessous,
- le risque d'approvisionnement, noté GSR dans l'équation ci-dessous,
- la substitution en termes de risque d'approvisionnement, noté SEI dans l'équation ci-dessous,
- la substitution en termes d'importance économique, noté SSR dans l'équation ci-dessous,
- la difficulté à recycler la matière, noté EoLRR dans l'équation ci-dessous.

$$\text{Indice de Criticité} = \sqrt[5]{YR * GSR * SEI * SSR * EoLRR}$$

Le calcul de la première métrique est basé sur les données publiées par l'USGS dans ces *Mineral Commodity Summaries* (USGC, 2020). Les quatre autres métriques sont elles calculées en fonction des données publiées par la Commission européenne (EU). L'équation ci-dessus permet de convertir ces 5 métriques en un indicateur synthétique, avec un score minimum de 0 pour une matière jugée comme non critique et un score maximal de 1 pour la matière jugée la plus critique (Vaija et Philipot, 2018).

Les résultats pour un panel de 4 matériaux sont présentés dans la Figure 5 ci-dessous

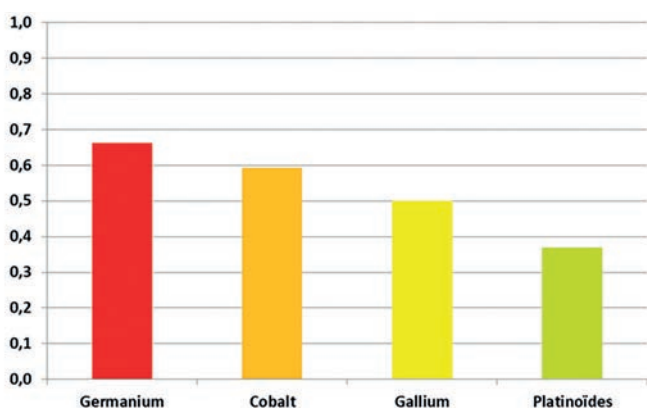


Figure 5 : Exemple d'indices de criticité calculés pour 4 matériaux (source : Orange – Travaux OLN/GDM).

Sur la base de la liste publiée en 2012 par le groupe Orange, l'étude de 2018 a ainsi permis une mise à jour

en identifiant 18 matériaux critiques. Des développements additionnels ont également été apportés pour mettre en relief les facteurs de criticité en fonction des équipements dans lesquels sont présents les matériaux critiques (en fonction soit de la masse contenue, soit de la valeur du contenu en matériau).

Ainsi, il a été identifié que les composants radiofréquences utilisés pour la 5G sont à base de silicium (SOI ou *Silicon on Insulator*), d'arséniure de gallium (GaAs), d'alliage silicium-germanium (SiGe), de nitrure de Gallium (GaN) ou de phosphore d'indium (InP). Les composants à base de silicium bénéficient actuellement d'une préférence pour leurs propriétés et leur faible coût (90 % des commutateurs et récepteurs utilisés pour les composants RF sont fabriqués à partir de silicium).

Application aux récents processus d'achat d'équipements réseaux

En complément des analyses réalisées à l'aide de la méthode d'ACV, Orange met en concurrence ses différents fournisseurs lors des phases d'achat (il est à noter que le Groupe travaille également en amont de la phase de conception, *via* des projets de recherche & développement ou de standardisation avec les industriels). Ainsi, depuis 2018, l'acquisition d'équipements réseaux s'accompagne de l'introduction dans les cahiers des charges d'exigences liées à l'évaluation de l'économie circulaire. Celles-ci ont été déclinées des travaux en cours dans le groupe de travail CEN/CENELEC (CEN/CLC/JTC 10 – *Energy-related products – Material Efficiency Aspects for Ecodesign*). Ces deux organismes de standardisation (le CEN et le CENELEC) ont en effet été désignés par la Commission européenne, à travers le mandat M/543, pour mettre en place des méthodes d'évaluation couvrant les différentes thématiques de l'économie circulaire (capacité à réparer, à recycler, à reconditionner, etc.), et ce pour tout type d'équipement nécessitant de l'énergie (noté ERP ou *Energy Related Product*). Ces travaux couvrent également la mise en place d'une méthode d'évaluation du contenu en matériaux critiques de ce type d'équipements. Les exigences imposées par Orange lui étant spécifiques, cela a nécessité un dialogue extensif avec chacun des industriels pour s'assurer de leur bonne compréhension des exigences de l'opérateur.

Suite à ce constat fait en mai 2019, Orange a rejoint les travaux lancés par l'ITU-T (entité de standardisation pour le secteur des télécommunications). Les experts d'Orange Labs peuvent ainsi collaborer avec les fournisseurs participant à ce groupe de travail (par exemple, Apple, Cisco, Ericsson, Huawei ou Nokia) pour améliorer les méthodes développées en interne. Ce développement se met en place sous la forme d'un document, le *Design Guidelines to achieve the Circular Economy Principles* (ITU-T, 2019), dont les principes sont notamment décrits dans Andrae, Vaija et Halgand (2020).

La Figure 6 de la page suivante présente un aperçu de la quantité de matériaux critiques utilisés, sur la base des données fournies par les industriels dans le cadre du processus

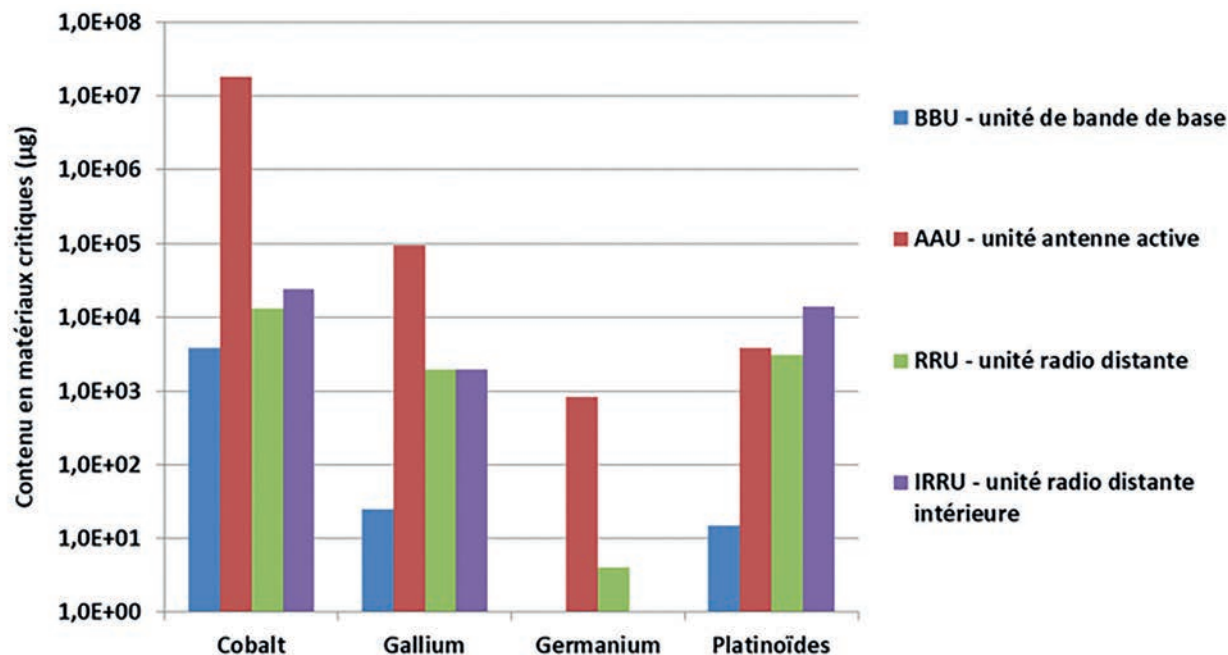


Figure 6 : Sélection de 4 matériaux critiques contenus dans 4 équipements réseaux différents (source : Orange –Travaux OLN/GDM).

d'achat. Cette figure détaille le contenu d'une sélection de 4 matériaux critiques pour 4 équipements réseaux : *Baseband Unit* (BBU – unité de bande de base), *Active Antenna Unit* (AAU – unité antenne active), *Remote Radio Unit* (RRU – unité radio distante) et *Indoor Remote Radio Unit* (IRRU – unité radio distante intérieure).

Ces retours permettent ainsi à Orange d'améliorer sa connaissance du contenu en matériaux critiques de chaque nouvel équipement et également d'inciter les industriels à travailler sur cette question (tout d'abord en réalisant une analyse portant sur le contenu en matériaux critiques de leurs équipements pour répondre à la demande client, puis en se positionnant sur la question de la substitution).

Bibliographie

VAN OERS L., DE KONING A., GUINÉE J. B. & HUPPES G. (2002), *Abiotic resource depletion in LCA Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook*, Road and Hydraulic Engineering Institute.

CML (2016), *CML-IA Characterisation Factors*, consultable sur : <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

PRADEL M., GARCIA J. & VAIJA M. S. (2019), « Guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des ressources minérales et de leur criticité en Analyse du Cycle de Vie », projet de recherche collaboratif 17.6 Réseau EcoSD.

MINERALINFO (2016), « Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le gallium », août, consultable à : http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches_criticite/fichecriticitegallium-publique160912.pdf

VAIJA M. S. (2016), « L'analyse du cycle de vie au service d'une politique responsable de consommation des métaux stratégiques chez Orange », *Annales des Mines, Responsabilité & Environnement*, avril, n°82, pp. 99-104.

DELOITTE, BGS, BRGM & TNO (2017), "Study on the review of the list of Critical Raw Materials Criticality Assessments", European Commission, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 93 pages.

USGS (2020), "Mineral Commodity Summaries", consultable à : <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information>

VAIJA M. S. & PHILIPOT E. (2018), "Multiple facets of circular economy applied to telecommunications operator's activities", conférence Going Green – CARE INNOVATION 2018, Schoenbrunn Palace Conference Centre, Vienna, November 26-29.

ITU-T (2019), "Design Guidelines to achieve the Circular Economy Principles", consultable à : https://www.itu.int/ITU-T/workprog/wp_item.aspx?isn=15129

ANDRAE A. S. G., VAIJA M. S. & HALGAND S. (2020), "Method for determining the Circularity Score of ICT goods", *International Journal of Advanced Research in Engineering & Management (IJAREM)*, pp. 1-15.