

BENCHMARK DES INDICATEURS DE CIRCULARITE ET LIENS AVEC L'ACV

RAPPORT FINAL

Juin 2021

Responsables scientifiques :

- **Michael Saidani, Bernard Yannou**
CentraleSupélec, 3 Rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette



- **Stéphane Le Pochat, Aude Monteil**
EVEA, 11 rue Voltaire, 44000 Nantes



L'association SCORELCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :

***SCORELCA**, Benchmark des indicateurs de circularité et liens avec l'ACV, 2021, 66 pages, n°2020-03.*

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr
- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORELCA.
- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Comité de suivi pour Score LCA : Jean-Paul Cazalets, Marion Pasquier – TOTAL ; Nathan Sonnalier – ENGIE ; Daniel Dunet, Oliver Keserue – VEOLIA ; Anne Grau, Denis Le Boulch, Hervé Romano – EDF ; Stéphane Morel, Yves Babian, Fabrice Abraham – RENAULT ; Rafaele Desplats, Erwan Autret – ADEME ; Benoit Aliadière - SNCF; Christophe Calais, Gilbert Fuchs – ARKEMA ; Patricia Martz – L'OREAL ; Bénédicte Couffignal – RECORD ; Philippe Osset, Jade Garcia - SCORE LCA

RESUME

Identifier, sélectionner et déployer les bons indicateurs de circularité (c-indicateurs) est essentiel pour à la fois évaluer et améliorer la performance des produits, des entreprises et des collectivités dans une perspective d'économie circulaire (EC). S'appuyant sur la taxonomie initiale des indicateurs d'EC de Saidani et al. (2019), ce projet étend l'identification des ensembles de c-indicateurs à plus de 100. Des tendances statistiques et des analyses critiques sur ces c-indicateurs sont données. Dans l'étude primaire, chaque ensemble de c-indicateurs a été classé sous dix caractéristiques. En collaboration avec un groupe de réflexion composé d'experts de l'EC issus de grandes entreprises industrielles françaises, cinq nouvelles caractéristiques ont été ajoutées afin de mieux caractériser un ensemble de c-indicateurs pour son utilisation pratique dans un contexte industriel. Ces nouvelles caractéristiques sont : (i) les sphères d'EC considérées, (ii) les étapes du cycle de vie couvertes, (iii) la disponibilité des cas d'utilisation, (iv) la popularité, et (v) la transparence. L'adoption d'une approche systémique et considérant l'ensemble du cycle de vie est cruciale pour définir ou sélectionner un ensemble ad hoc d'indicateurs de circularité, car la performance de circularité des systèmes est influencée par leur conception (pré-vie), leur utilisation (vie) et les options ou capacités de fin de vie. Sur cette base, un ensemble modulaire de dix c-indicateurs complémentaires est particulièrement sélectionné couvrant la performance de circularité dans son ensemble, incluant indicateurs de flux de matières, de flux d'énergie, d'impact, de conception, et de performance à l'échelle de l'entreprise, pour n'en citer que quelques-uns. En pratique, pour aider les décideurs travaillant dans l'industrie (par exemple, les gestionnaires de projets, les ingénieurs, les chefs de produit, les concepteurs) à calculer et à déployer correctement ces c-indicateurs, un nouveau modèle de fiche d'information très visuel est élaboré pour les c-indicateurs, comprenant notamment l'objectif et le principe de fonctionnement de l'indicateur, une illustration de sa ou ses formules, les entrées/données requises, ainsi qu'un exemple de cas d'utilisation, le cas échéant. Enfin, une discussion sur l'articulation, le positionnement et la complémentarité ou le conflit potentiel (compromis) entre les c-indicateurs et les indicateurs basés sur l'ACV est menée, à travers différents scénarios et exemples illustratifs.

MOTS CLES

Economie circulaire, indicateurs de circularité, taxonomie, analyse de cycle de vie, boucles d'économie circulaire, performance environnementale, corrélation.


SUMMARY

Deploying the right circularity indicators (c-indicators) is key to both assess and improve the performance of products, companies, and regions in a circular economy (CE) perspective. Building on the initial taxonomy of CE indicators by Saidani et al. (2019), this project extends the identification of sets of c-indicators to more than 100. Statistical trends and critical analysis on these c-indicators are given. In the primary study, each set of c-indicators was categorized under ten features. Working with a think tank of CE experts from major French industrial companies, five new features have been added to better characterize a set of c-indicators to its practical use in an industrial context. These new features are: (i) CE spheres considered, (ii) life cycle stages covered, (iii) the availability of use cases, (iv) the popularity, and (v) transparency. Adopting a systemic and lifecycle approach is crucial to define or select an ad hoc set of circularity indicators, as the circularity performance of systems is influenced by their design (pre-life), usage (life), and end-of-life options or capabilities. On this basis, a modular set of ten complementary c-indicators is particularly proposed, covering a wider spectrum of the CE paradigm, including material flow, energy flow, impact, design, or corporate-based indicators, just to name a few. In practice, to support decision-makers in industry (e.g., managers, engineers, product leaders, designers) compute and deploy properly these c-indicators, a newly and highly visual factsheet for c-indicators is developed, including notably the purpose and working principle of the indicator, an illustration of its formula(s), the inputs/data required, as well as an example of use case, if any. Last but not least, discussion on the articulation, positioning, and potential complementarity or conflict (trade-offs) between c-indicators and LCA-based indicators are made, through different scenarios and illustrative examples.

KEY WORDS

Circular economy, circularity indicators, taxonomy, life cycle assessment, circular economy loops, environmental performance, correlation.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	6
1.1	Contexte de l'étude	6
1.2	Sigles	8
1.3	Terminologie	9
2	OBJECTIFS ET CONTENU DE L'ETUDE	10
3	PARTIE 1 : ETAT DE L'ART	11
3.1	Recensement et critères de sélection	11
3.2	Analyse et classification des indicateurs selon leur spécificité	13
3.3	Conclusion intermédiaire sur l'état de l'art : bilan, réflexion et perspectives.....	16
4	PARTIE 2 : ANALYSE APPROFONDIE DE 10+ INDICATEURS.....	17
4.1	Méthode de sélection des 10+ indicateurs.....	17
4.2	Liste des indicateurs sélectionnés.....	18
4.3	Format de fiche pour la description des indicateurs de circularité	21
5	PARTIE 3 : LIENS AVEC L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV).....	24
5.1	Comparaison ACV/EC via des cas d'étude de la littérature	25
5.2	Considérations générales sur les indicateurs	27
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	28
7	BIBLIOGRAPHIE	30
8	ANNEXES.....	31
8.1	Annexe 1 : Liste des contributions et livrables associés	31
8.2	Annexe 2 : Présentation des parties prenantes.....	32
8.3	Annexe 3 : Fiches c-indicateurs.....	34
8.4	Annexe 4 : Indice de réparabilité 	65

FIGURES

Figure 1 - Indicateurs de circularité : Défis actuels et opportunités	7
Figure 2 – Synthèse de 114 définitions de l'économie circulaire, Kirchherr et al. (2017).....	9
Figure 3 – Etapes de l'étude.....	10
Figure 4 – Evolution du nombre de publications sur des indicateurs d'économie circulaire depuis 2010.....	11
Figure 5 – Critères de recherche des sources bibliographiques, mis à jour depuis Saidani et al. (2019).....	11
Figure 6 – Ensemble des critères de classification utilisés pour l'analyse des jeux d'indicateurs recensés.	12
Figure 7 – Ensemble des critères de classification utilisés pour l'analyse des jeux d'indicateurs recensés (illustré, les 10 critères initiaux en bleu, les 5 nouveaux critères en doré)	13
Figure 8 – Répartition des indicateurs de circularité par niveaux d'implémentation	13
Figure 9 – Répartition des sources académiques/consultants/gouvernementale	14
Figure 10 – Répartition par transversalité de l'application (générique ou spécifique à un secteur).....	14
Figure 11 – Répartition par perspective de circularité (circularité potentielle ou circularité effective).....	14
Figure 12 – Répartition (nombre de c-indicateurs) par boucles de l'économie circulaire : recyclage, réparation, réutilisation, etc.....	15
Figure 13 – Répartition par types de performance : intrinsèque (flux) vs conséquente (impact).....	15
Figure 14 – Répartition sur les trois piliers du développement durable (1/2) (extrait de Kristensen and Mosgaard, 2020)	15
Figure 15 – Répartition sur les trois piliers du développement durable (2/2) (extrait de Oliveira et al., 2021)	16
Figure 16 – Synoptique de la méthode de sélection des 10 indicateurs.....	18
Figure 17 – 10 fiches associées aux indicateurs de circularité sélectionnés	20
Figure 18 – Exemple de fiches simples « c-indicators », http://www.circulareconomyindicators.com	21
Figure 19 – Exemple d'une factsheet « c-indicator » plus détaillée (Saidani, 2018).....	22
Figure 20 – Modèle de fiche c-indicateur proposé.....	23
Figure 21 – Compromis potentiel entre ACV et circularité. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA	24
Figure 22 – Frontière du système pour le cas d'étude #1. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA	25
Figure 23 – Impact carbone des stratégies circulaires. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA.....	25
Figure 24 – Score de circularité (CTI) et compromis environnementaux. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA	25
Figure 25 – Description du cas d'étude #2. Sources : Saunier, 2019, Webinar ACLCA ; Lonca et al., 2018.	26
Figure 26 – Résultats pour le cas d'étude #2. Sources : Saunier, 2019, Webinar ACLCA ; Lonca et al., 2018. ...	26
Figure 27 – Groupes de travail en cours pour une série de normes ISO sur la circularité. Source : AFNOR.....	28
Figure 28 – The Circularity Indicators Advisor (Saidani et al., 2019). Format : Excel.....	29

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Constat et enjeux actuels

Le concept d'économie circulaire appelle à une gestion plus durable et raisonnée des ressources tout au long du cycle de vie des produits et systèmes. Un tel paradigme économique se caractérise, du côté de la technosphère, par des bouclages de flux en promouvant les opérations de maintenance, de reconditionnement, de recyclage, tout en étant accompagné d'offres de services et de reprises qui rendent opérationnelles ces pratiques. La circularité a pour but de conserver la haute valeur et utilité des produits, matériaux et ressources à chaque instant, et ainsi de minimiser la génération de déchets et l'impact environnemental.

Ce concept d'économie circulaire, bien que non récent, connaît un intérêt croissant en raison de :

- La sensibilisation aux enjeux relatifs à la transition écologique et énergétique, notamment en milieu urbain et la multiplication des initiatives locales et territoriales (villes en transition, villes vertes, territoires à énergie positive).
- La loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire qui accélère la déclinaison opérationnelle des projets des entreprises et des collectivités françaises.
- La mise en place d'un réseau national des acteurs de la ville durable, pour développer les initiatives vertueuses en matière de construction, d'infrastructures, de gestion de services urbains de déchets, de transport, de traitement et de distribution de l'eau, d'énergie, de biodiversité, etc.
- La mobilisation des acteurs économiques, politiques et de la société civile autour de « think tanks » et de travaux pré-réglementaires sur les sujets d'économie circulaire (Institut National de l'Économie Circulaire, 2019).

Ces sujets ont toutefois des difficultés à dépasser le stade de la sensibilisation et ne se traduisent pas dans des modèles économiques concrets et pérennes. Plusieurs raisons expliquent cette situation : réglementation floue, faible visibilité à long terme pour les investisseurs sur les scénarios énergétiques, volatilité des prix des matières recyclées, absence de fiscalité environnementale contraignante ou suffisamment incitative. Plus généralement, il est noté un manque de systèmes organisationnels pour piloter d'un côté des investissements ambitieux en matière d'économie circulaire, et de l'autre piloter les activités industrielles par la réduction des flux de matière et d'énergie.

Cependant, un nombre croissant d'entreprises et de collectivités locales souhaitent s'engager dans la transition de leurs modèles économiques en faveur de modèles « circulaires ». Des deux côtés on voit donc émerger un besoin de pilotage, à moyen et long terme, d'investissements et de flux de matière et d'énergie à l'échelle des territoires et des organisations industrielles. Il est donc nécessaire de développer des méthodologies et outils basés sur des indicateurs pertinents d'investissements et de gestion des flux pour les différents acteurs concernés.

Dans le même temps, à ce jour, de nombreux outils, méthodes et indicateurs sont disponibles et activables pour diagnostiquer la performance environnementale des produits, des services, des projets et des activités d'une entreprise. Face à cette multitude d'outils, il est parfois difficile d'identifier les plus pertinents au regard de l'objectif et de la temporalité du projet. De même, si l'on privilégie une analyse basée sur le principe de l'économie circulaire, de nombreux indicateurs sont disponibles mais se limitent souvent à un diagnostic. Or, pour promouvoir des projets favorables à la transition écologique et qui sont créateurs de valeur pour l'entreprise, il faut mobiliser des indicateurs qui auront vocation à piloter des activités vers plus de circularité et de préservation de l'environnement (approche ACV) et les valoriser dans une logique de performance globale (incluant leurs impacts environnementaux et sociaux). Les décisions économiques d'investissement, de choix de projet devront être prises à l'aune des indicateurs de circularité, de performance environnementale et leur traduction en termes de création de valeur pour l'organisation.

Répondre à une demande émergente

Comme mentionné dans le texte de l'appel à projet SCORELCA n° 2020-03, de plus en plus d'organisations souhaitent atteindre des objectifs d'économie circulaire, et engagent des démarches dans ce sens. Afin notamment non seulement de suivre leurs progrès (en interne, de façon opérationnelle) mais aussi de communiquer leur avancement (ultérieurement, de façon crédible), ces organisations souhaitent disposer d'indicateurs (KPI) de circularité qui leur permettent d'atteindre leurs objectifs.

Bien que cette notion d'économie circulaire soit de plus en plus discutée et reconnue pour contribuer à la réalisation des objectifs du développement durable, on ne note toujours pas de consensus sur une définition stabilisée la concernant : 114 définitions de l'économie circulaire, retranscrites en 17 catégories, ont notamment été recensées par Kirchherr et al. (2017). On peut y voir ici une des raisons du flou et de la grande variété d'indicateurs développés en lien avec l'économie circulaire, que ce soit au niveau de leurs périmètres d'actions, de leurs objectifs premiers, ou de leurs utilisations préférentielles.

Effectivement, une vision commune – partagé par les universitaires, industriels et instances politiques (Commission Européenne, 2015 ; Fondation Ellen MacArthur, 2015 ; Geissdoerfer et al., 2017 ; Saidani et al., 2017) – a émergé sur la nécessité de mesurer le progrès et les impacts de cette transition. Ainsi, de nombreux indicateurs de circularité ont été développés ces dernières années comme outils et catalyseurs vers des pratiques plus circulaires, sous la condition sine qua non que les acteurs impliqués dans cette transition puissent avoir accès et correctement employer les indicateurs qui leurs sont les plus appropriés, comme illustré sur la Figure 1.

L'utilisation d'indicateurs paraît a fortiori pertinente pour un concept aussi complexe – multi-échelles, multi-acteurs, préconisant une considération du cycle de vie et une pensée systémique – qu'est l'économie circulaire. Les indicateurs ont en effet la capacité de synthétiser la complexité de nos environnements mouvants dans une quantité d'information plus facilement compréhensible, gérable et exploitable. Plus généralement, de tels indicateurs de circularité peuvent être employés à des fins informatives (p. ex., benchmarking, aide à la prise de décision), amélioratives (identification de points de progrès), managériales (conduite du changement), communicatives, formatives, ou éducatives.

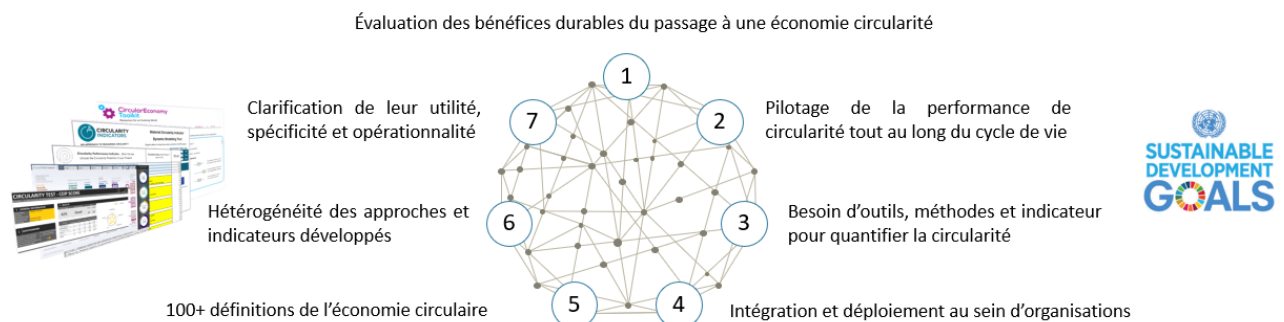


Figure 1 - Indicateurs de circularité : Défis actuels et opportunités

Or, la mise en place progressive, hors de tout contexte normatif, de ces indicateurs a abouti à l'existence d'une hétérogénéité d'approches pour mesurer la circularité (EPE, 2018 ; WBCSD, 2019 ; Saidani et al., 2019). De nouveaux travaux sont en cours sur le sujet au sein de l'ISO/TC 323, notamment animés par la France (cf. groupe miroir « GT Metrics » de la Commission AFNOR X30M). Ces indicateurs, notamment issus de travaux publiés et des travaux normatifs, ont été recensés et analysés de manière exhaustive. Le but étant à la fois d'apporter de la clarté sur cette multitude d'indicateurs disponibles, ainsi que d'aider à sélectionner le panel des quelques indicateurs qui soient les plus pertinents, spécifiques et opérationnels pour une organisation, de manière à lui permettre de couvrir ses objectifs associés à la circularité.

Positionnement et perspectives prometteuses

Complémentaire au projet SCORELCA (2019) sur les « boucles matière, boucles produits et ACV » (Etude N° 2018-02) qui a abouti à des recommandations concernant l'évaluation de la performance environnementale des boucles, ce projet vise à entrer plus en avant dans la circularité, et produire des recommandations d'indicateurs de circularité qui intègrent l'aspect environnemental. Elles seront fondées sur une analyse structurée des indicateurs existants et pourront servir de contribution à la normalisation à l'ISO/TC 323.

Au-delà de produire des mesures, ces indicateurs de circularité doivent aussi amener à des actions utiles et justifiées de la part des acteurs industriels, au travers, par exemple, de plans de pilotage de la transition, d'amélioration ou de mitigation. Le processus de transition vers une économie circulaire consiste en effet en des moyens, des activités et des réalisations organisationnelles, managériales et technologiques. L'information – au travers d'indicateurs appropriés – sur les moyens et activités peut aider à déterminer ce qui est nécessaire pour atteindre les objectifs de circularité.

Bien que les indicateurs de circularité semblent être une bonne aide pour accompagner et guider ces praticiens dans la prise en compte des composantes de l'économie circulaire, il existe un fossé notable entre les indicateurs (théorique) développés par les universitaires et leur (faible) utilisation (pratique) dans la réalité industrielle. Réduire ce fossé et favoriser l'acceptation et l'intégration progressive de tels indicateurs au sein des processus de conception et de management est l'affaire de tous. Une co-construction de ces indicateurs est une voie d'avenir. Dans cet esprit, le recensement et la classification des indicateurs de circularité peut servir de base non seulement pour tester et valider (ou non) leur bonne compréhension par les concepteurs, ingénieurs, fabricants ou gestionnaires de projets, mais également identifier les manques des indicateurs actuels pour envisager leur consolidation, leur combinaison et/ou la construction d'indicateurs nouveaux (Saidani et al., 2019).

En pratique, bien qu'une grande variété d'indicateurs ait été développée ces dernières années, il reste à jauger leur degré d'adoption et maturité d'utilisation par les acteurs industriels, notamment de façon intégrée au processus de conception et développement. Les champs d'applications sont vastes – par exemple industries aéronautique, aérospatiale, automobile, de l'énergie, textile – et la généricité de la plupart des indicateurs de circularité existants à l'échelle micro peut être, dans une première approche, un point positif à leur mise en œuvre.

Enfin, s'il semble que ces indicateurs de circularité – que l'on peut considérer comme des heuristiques ou KPI de haut niveau – et leurs outils associés sont plus rapidement déployables et plus facilement compréhensibles que certaines méthodes et indicateurs d'évaluation environnementale comme l'ACV, dans l'orientation de prises de décisions soutenables au sens du développement durable, il reste à fournir des preuves tangibles que ces indicateurs sont en corrélation avec un « mieux » économique, environnemental et/ou sociétal. Il convient alors d'être en mesure de valider si ce passage à des pratiques plus circulaires apporte un « mieux » vis-à-vis des trois piliers du développement durable, en mettant par exemple en regard ces indicateurs de circularité intrinsèques avec certains indicateurs conçus pour jauger la performance économique, environnementale et/ou sociale, évaluant ainsi la circularité conséquentielle des boucles de circularité existantes et vérifiant (ou non) la compatibilité de l'équation économie circulaire avec celle du développement durable. Dans cette perspective, effectuer un bouclage entre indicateurs de circularité et indicateurs de performances économiques, environnementales et sociales, apparaît également comme un axe de travail important au sein de ce projet.

1.2 Sigles

Sigle	Signification
ACV	Analyse de cycle de vie
C-indicateur	Indicateur de circularité
EC	Economie circulaire
EIT	Ecologie industrielle et territoriale
LCC	Life cycle cost (coût en cycle de vie)
MFA	Material flow analysis (analyse de flux de matière)

1.3 Terminologie

La terminologie utilisée dans la présente étude s'appuiera sur les référentiels suivants :

Référentiel	Usage
ISO14050 v2020 Management environnemental – Vocabulaire	Socle de définitions du management environnemental
Julian Kirchherr et al. - Resources, Conservation & Recycling - Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions Franck AGGERI – Inter-Mines - L'économie circulaire : mise en perspective historique et enjeux contemporains	Définition de l'économie circulaire
ISO14033 v2019 Management environnemental -- Information environnementale quantitative -- Lignes directrices et exemples	Indicateurs environnementaux
ISO14009 v2020 Systèmes de management environnemental -- Lignes directrices pour intégrer la circularité des matériaux dans la conception et le développement	Circularité
EN45550 v2020 Material Efficiency Aspects for Ecodesign	Maintenance, durabilité et fin de vie

Définition consensuelle de l'économie circulaire

L'économie circulaire est un concept popularisé à la fin des années 2000.

La notion connaît un succès croissant en France au début des années 2010, avec la parution d'un rapport de l'ADEME en 2013. En 2014, les premières assises sur l'économie circulaire réunissent plus de 2 000 personnes à Paris. En 2016, la loi de transition énergétique en fait l'un des piliers de son action. Enfin, en avril 2018, la feuille de route sur l'économie circulaire, qui fait écho au paquet économie circulaire adopté par le parlement européen en décembre 2017, constitue la dernière étape de l'inscription à l'agenda public de ce concept.

Après l'analyse de 114 définitions de l'économie circulaire (Figure 2), Kirchherr et al. (2017) propose une définition synthétique, qui est à ce jour la plus reprise (nombre de citations) par les chercheurs en économie circulaire. L'économie circulaire est définie comme « un système économique qui remplace le concept de "fin de vie" par la réduction, la réutilisation alternative, le recyclage et la récupération des matériaux dans les processus de production/distribution et de consommation. Elle opère au niveau micro (produits, entreprises, consommateurs), méso (parcs éco-industriels) et macro (ville, région, nation et au-delà), dans le but de réaliser un développement durable, créant ainsi simultanément une qualité environnementale, une prospérité économique et une équité sociale, au bénéfice des générations actuelles et futures. Elle est rendue possible par de nouveaux modèles commerciaux et des consommateurs responsables » (Kirchherr et al., 2017)

Typical definitions of the circular economy.

Typical definition (in sample)	Full sample	Before 2012	2012 or later	Peer-reviewed	Practitioner
Dimensions	Reduce, reuse, recycle Systems perspective Economic prosperity	Reduce, reuse, recycle Environmental quality Economic prosperity	Reduce, reuse, recycle Systems perspective Economic prosperity	Systems perspective Environmental quality Economic prosperity	Reduce, reuse, recycle Economic prosperity
Example	"CE is [a] closed loop material flow in the whole economic system [...] in association with the so called 3R principles [...] Taking into account economic aspects CE [...] minimizes matter [...] without restricting economic growth" (Lieder and Rashid 2016)	"[CE] is a mode of economic development [...] requires compliance with ecological laws [...]. It is, essentially, an ecological economy that follows the principles of "reducing resource use, reusing, and recycling" (Zhu and Nailing 2007)	"CE is [a] closed loop material flow in the whole economic system [...] in association with the so called 3R principles [...] Taking into account economic aspects CE [...] minimizes matter [...] without restricting economic growth" (Lieder and Rashid 2016)	"The core of CE [are] the '3R' principles—reduction, reuse, and recycling of materials and energy. [...] The approach is expected to achieve an efficient economy while discharging fewer pollutants. The strategy requires complete reform of the whole system of human activity" (Yuan et al., 2006, p.5)	"[CE] is about decoupling growth from resource consumption [...]. It's about designing products [that] are easier to reuse or recycle. [...]" (Dupont-Ingilis 2015)

Note: Most frequent 4R combination listed in 'dimensions'. 'Systems perspective', 'environmental quality' and 'economic prosperity' listed in 'dimensions' if ≥ 40% in coding for at least one coder (as depicted in Tables 3 and 4). Example definitions are abridged and thus stylized; full sample = All 114 definitions.

Figure 2 – Synthèse de 114 définitions de l'économie circulaire, Kirchherr et al. (2017)

Définition d'un indicateur de circularité

Un indicateur est une mesure quantitative ou une information qualitative permettant d'évaluer une performance par rapport à un objectif et une cible. Les indicateurs de circularité vont ainsi permettre aux membres de SCORELCA de situer l'efficacité de leurs produits et activités au regard des principes de l'économie circulaire.

2 Objectifs et contenu de l'étude

L'objectif principal de cette étude est de fournir aux membres de SCORELCA des indicateurs opérationnels et harmonisés permettant de mesurer la circularité de leur activité.

L'objectif secondaire de cette étude est de faire le lien avec d'autres méthodes et en particulier l'ACV, afin d'intégrer si possible ces indicateurs dans les outils existants d'évaluation environnementale.

L'étude est structurée en 3 parties : un état de l'art, une analyse détaillée et des recommandations (voir Figure 3).

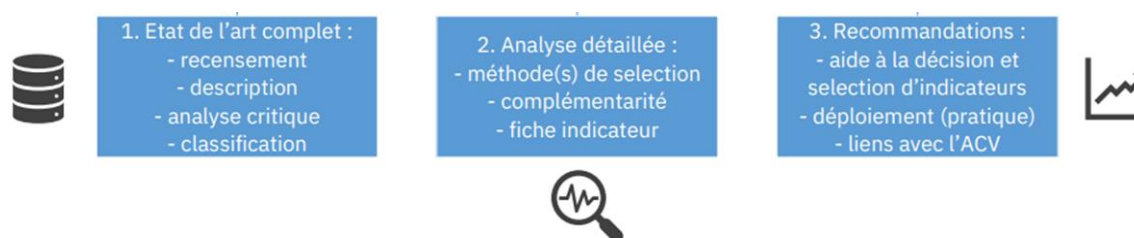


Figure 3 – Etapes de l'étude

1. Réaliser un état de l'art complet : recensement et analyse des indicateurs

- Préciser les objectifs que les organisations souhaitent atteindre avec des indicateurs de circularité ;
- Elaborer des spécifications pour que les indicateurs de circularité répondent de façon appropriée aux objectifs des organisations.

2. Mener une analyse approfondie de 10 indicateurs

- Proposer une méthodologie pour sélectionner les 10 indicateurs qui seront détaillés ;
- Développer un modèle de fiche pour ces indicateurs ;
- Mettre en avant les liens entre indices de circularité, flux de matières, indices de criticité et ACV.

3. Recommandations et propositions

- Produire des recommandations d'usage d'indicateurs de circularité appropriés, crédibles et opérationnels ;
- Fournir des recommandations sur la mise en œuvre des indicateurs les plus pertinents dans différents contextes, pour leur communication en interne et en externe, et pour les faire évoluer afin de répondre encore mieux aux objectifs des organisations.

L'ensemble des livrables, incluant rapports, présentations, et outils associés, est listé en [Annexe 1](#).

Les matériels et méthodes déployés pour fournir des éléments de réponses concrets, pratiques et pertinents aux éléments ci-dessus sont les suivants :

- une revue de littérature étendue des outils et indicateurs développés par les chercheurs académiques, les consultants, ainsi que par certaines entreprises et institutions publiques ; notamment via l'utilisation des bases de données d'articles scientifiques (p. ex. ScienceDirect) auxquelles CentraleSupélec a accès ;
- une analyse systématique de ces indicateurs au regard, entre autres, des composantes et définitions de l'EC, de leurs utilisations possibles et améliorations potentielles ;
- une nouvelle proposition de typologie d'indicateurs de circularité, tirée par les usages et les objectifs de ce projet, afin de faciliter la sélection et l'utilisation d'indicateur(s) approprié(s) à un besoin ;

des entretiens avec les membres pour valider la méthodologie et sélection d'indicateurs pertinents.

3 Partie 1 : état de l'art

L'objectif de cette partie est d'établir un état de l'art robuste concernant les indicateurs de circularité dont le nombre devient pléthorique. Cet état de l'art doit notamment s'appuyer sur un recensement des sources de la littérature le plus exhaustif possible, et sur l'examen approfondi d'un nombre plus restreint d'indicateurs, ceci afin de permettre une sélection et synthèse en 10 indicateurs notables.

3.1 Recensement et critères de sélection

Comme le montre le graphe ci-dessous, le nombre de publications relatives aux méthodes et indicateurs de mesure de l'économie circulaire a connu une croissance spectaculaire ces 10 dernières années, avec une augmentation notable en 2020 (Figure 4).

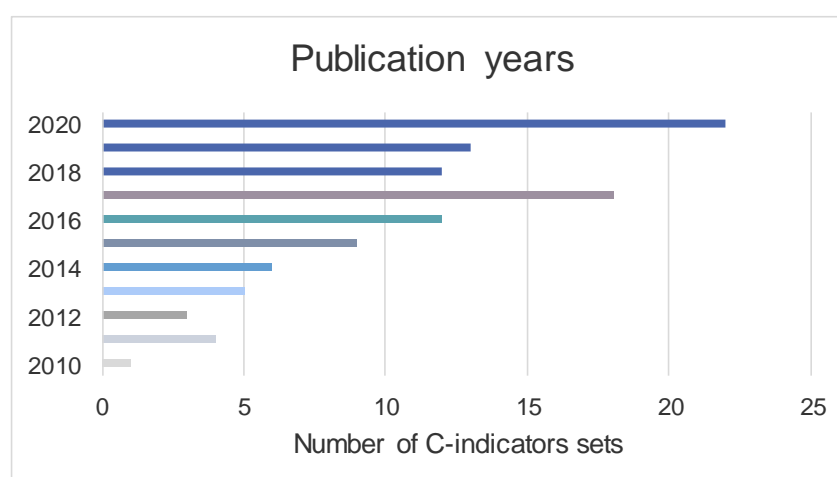


Figure 4 – Evolution du nombre de publications sur des indicateurs d'économie circulaire depuis 2010

Le travail de recensement bibliographique s'est appuyé sur le travail réalisé par Michaël Saidani en date de fin 2018 (Saidani et al., 2019) qui identifiait 55 indicateurs de circularité. Ce travail a abouti à la création d'un outil en ligne, le C-Indicator Advisor (CIA) (<http://circulareconomyindicators.com/>).

Le recensement réalisé dans le cadre de cette étude a consisté à compléter ce travail avec les nouvelles publications parues sur la période 2019-2020. La recherche bibliographique ainsi effectuée, clôturée à la date de fin 2020, a permis de recenser un total de 105 références correspondant à autant de jeux d'indicateurs de circularité. Les critères de recherche utilisés pour référencer les sources bibliographiques sont donnés dans la Figure 5. **Toutes ces sources ont été référencées dans un tableur Excel, fourni en annexe de ce rapport.**

Criteria		Research item and filter
Key words		{circular economy OR circularity} AND {indicators, indices, index, metrics, measure, assessment, evaluation}
Databases	Academic	Science Direct, SAGE, Springer, Taylor and Francis, Wiley, Emerald, JSTOR, and Google Scholar.
	Non-academic	Web-pages and reports from lobby organizations (e.g. the Ellen MacArthur Foundation), research organisations (e.g. the European Environmental Agency), and governmental agencies (e.g. the European Commission) through Google searches.
Language		English
Geographic scope		Worldwide
Publication years (age of material)		(2000 –) 2010 – December 2020

Figure 5 – Critères de recherche des sources bibliographiques, mis à jour depuis Saidani et al. (2019)

Les articles universitaires traitant des c-indicateurs incluent, par exemple, la taxonomie de 55 jeux d'indicateurs de circularité (Saidani et al., 2019) ou la revue critique de 74 approches, méthodes et outils pour évaluer la performance de circularité à une échelle micro (Roos Lindgreen et al., 2020). D'autres sources, non-académiques mais développées par des groupes de consulting pour entreprises (p. ex., les « Circular Transition Indicators » proposés par WBCSD et KPMG) et des

organisations environnementales ou institutionnelles (p. ex., les 10 indicateurs clés pour piloter l'économie circulaire en France) ont également été considérées.

Chaque source a été caractérisée d'après les critères initiaux de l'outil « C-Indicators Advisor » (CIA) (Saidani et al., 2020), qui ont été complétés dans le cadre de cette étude. Les principaux critères de caractérisation des sources sont les suivants :

- Niveau (périmètre) considéré pour les indicateurs de circularité :
 - Micro : niveau matériau et/ou produit
 - Méso : entreprises, parcs d'activité (EIT)
 - Macro : zones économiques à l'échelle de régions, pays, ou zones continentales voire monde
- Le type de boucle d'économie circulaire :
 - Recyclage
 - Réutilisation, remanufacturing
 - Prolongation de la durée de vie
- La perspective : (rétrospective ou prospective)
 - Potentielle (i.e., potentiel de circularité d'un produit lors de sa conception)
 - Effective (i.e., circularité effective/réelle/actuelle d'un produit)
- La performance traduite par le(les) indicateur(s) d'économie circulaire :
 - Intrinsèque ou de flux (exprimant un taux de recirculation de ressources, en %)
 - Conséquentielle ou d'Impacts : impacts environnementaux, sociaux, économiques
- Le format de la méthode publiée :
 - Logiciel
 - Formule(s) de calcul
- Le type de la source :
 - Académique
 - Entreprise ou consultant
 - Organisation gouvernementale ou environnementale

Les Figures 6 et 7 ci-dessous indiquent l'ensemble des critères de classification utilisés. Cette figure montre une augmentation des catégories de la taxonomie d'indicateurs de circularité par rapport à (Saidani et al., 2019), s'appuyant sur une revue de l'existant, un brainstorming, et le retour des membres SCORELCA.

Catégories (critères)
Niveaux (<i>micro, meso, macro soit produit, organisation, territoire</i>)
Type de bouclages pris en compte (<i>maintenance, réutilisation, recyclage</i>) + <i>autres boucles (p. ex. reman)</i>
Perspective (<i>effective, potentielle, utilisation en conception, en évaluation ou en communication</i>)
Performance (<i>circularité intrinsèque ou élargie aux conséquences en durabilité</i>)
Unités (<i>quantitatif, qualitatif</i>)
Dimension (<i>score unique, multicritères</i>)
Usages (<i>p.ex. amélioration, comparaison, communication</i>) + (<i>re-</i>)conception
Sources (<i>académiques, entreprises, organismes</i>)
Transversalité (<i>générique, spécifique à un secteur</i>)
Format (<i>outil en ligne, Excel, formules</i>)
Sphère de l'économie circulaire (<i>technosphère, biosphère</i>)
Etapes du cycle de vie concernées (<i>conception, production, utilisation, fin de vie</i>)
Cas d'application disponible (<i>oui, non, lien vers un exemple</i>)
Popularité de l'indicateur (<i>reconnu, marginal</i>) + <i>operationalité</i>
Transparence (<i>totale i.e. formules disponibles, zone d'ombre i.e. "black box"</i>)

Figure 6 – Ensemble des critères de classification utilisés pour l'analyse des jeux d'indicateurs recensés.

Niveaux de mise en œuvre	Type de bouclage	Perspective de circularité	Performance évaluée	Unités
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux) 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitatif • Qualitatif
Dimension	Usage (destination)	Type de source (auteur)	Transversalité de l'application	Format (accessibilité)
<ul style="list-style-type: none"> • Multicritères • Score unique 	<ul style="list-style-type: none"> • Information • Prise de décision • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Académique • Entreprises • Organismes 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Outil en ligne • Excel • Formules
Sphère de l'éco. circulaire concernée	Etapas du cycle de vie impactées	Cas d'application	Popularité	Transparence
<ul style="list-style-type: none"> • Technosphère • Biosphère • Les deux 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • Oui • Non 	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnu • Intermédiaire • Marginal 	<ul style="list-style-type: none"> • Formules disponibles • Boîte noire

Figure 7 – Ensemble des critères de classification utilisés pour l'analyse des jeux d'indicateurs recensés (illustré, les 10 critères initiaux en bleu, les 5 nouveaux critères en doré)

3.2 Analyse et classification des indicateurs selon leur spécificité

Nous utilisons les critères de la Figure 7 pour catégoriser ces 105 jeux d'indicateurs de circularité :

- Répartition par niveau : micro/méso/macro (Figure 8)
- Répartition des sources : académiques/consultants/gouvernementale (Figure 9)
- Répartition par transversalité sectorielle de l'application : générique/spécifique (Figure 10)
- Répartition par perspective de circularité : potentielle/réelle (Figure 11)
- Répartition par types de boucles de l'économie circulaire : recyclage/réparation/réutilisation (Figure 12)
- Répartition par types de performance : intrinsèque, conséquentielle (Figure 13)
- Répartition sur les trois piliers du développement durable (Figures 14 et 115)

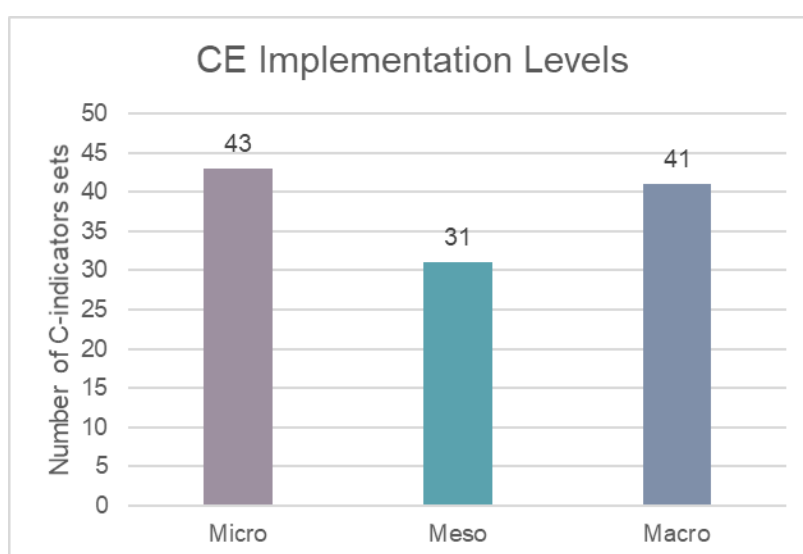


Figure 8 – Répartition des indicateurs de circularité par niveaux d'implémentation



Figure 9 – Répartition des sources académiques/consultants/gouvernementale

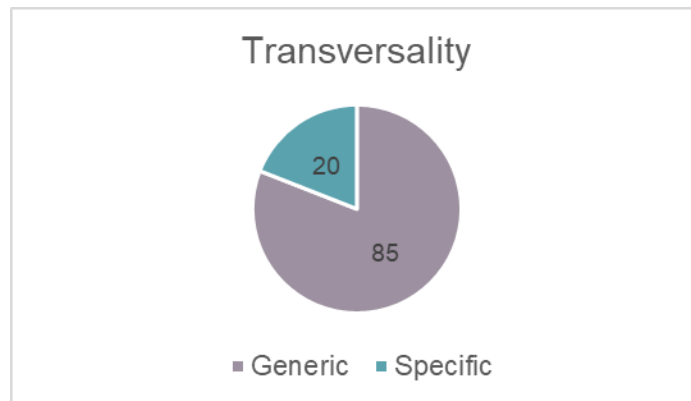


Figure 10 – Répartition par transversalité de l'application (générique ou spécifique à un secteur)

N.B. : Parmi les 20 jeux de c-indicateurs spécifiques à une industrie, le secteur du bâtiment et de la construction (et déconstruction) est le plus avancé en termes d'indicateurs *ad hoc* à un secteur.

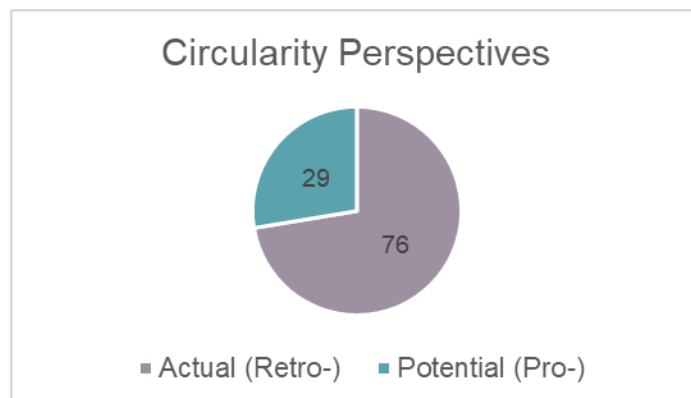


Figure 11 – Répartition par perspective de circularité (circularité potentielle ou circularité effective)

N.B. : Les indicateurs de circularité potentielle sont particulièrement développés à un niveau micro lors de la conception de nouveaux produits pour évaluer leur potentiel de circularité.

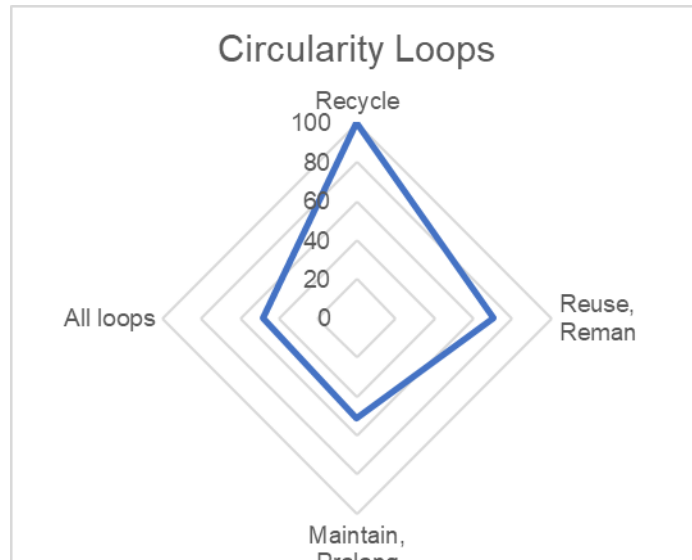


Figure 12 – Répartition (nombre de c-indicateurs) par boucles de l'économie circulaire : recyclage, réparation, réutilisation, etc.

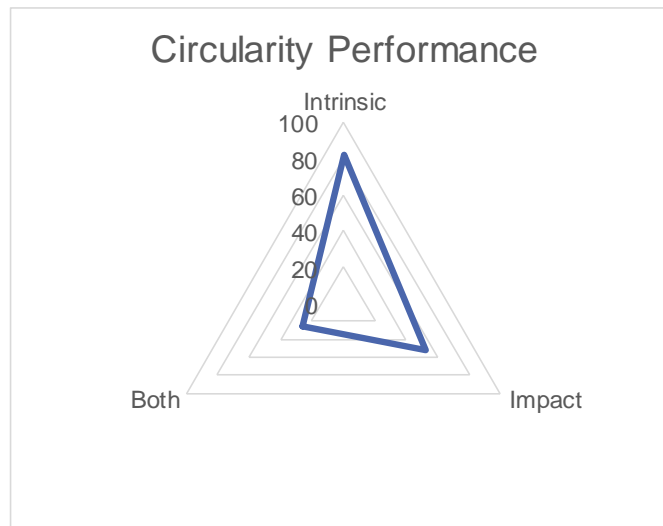


Figure 13 – Répartition par types de performance : intrinsèque (flux) vs conséquentielle (impact)

N.B.: Les jeux d'indicateurs couvrant à la fois circularité intrinsèque et conséquentielle se trouvent principalement à une échelle macro (région, pays).

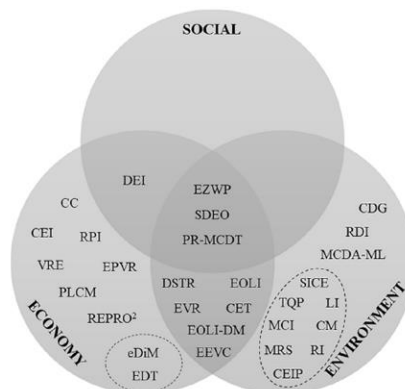


Figure 14 – Répartition sur les trois piliers du développement durable (1/2) (extrait de Kristensen and Mosgaard, 2020)

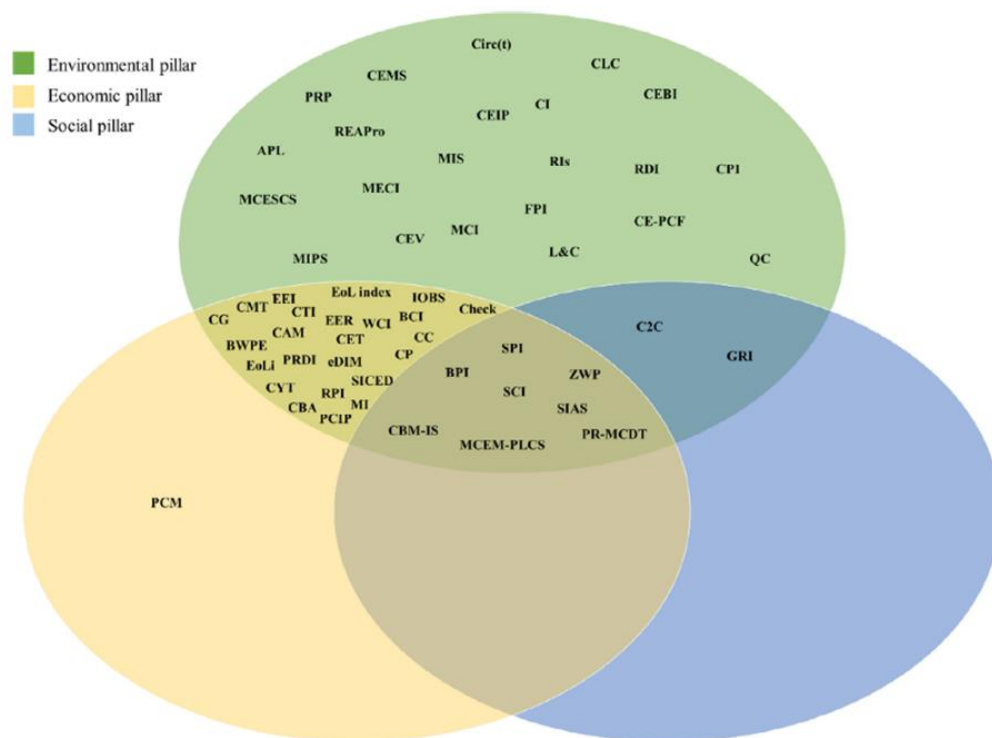


Figure 15 – Répartition sur les trois piliers du développement durable (2/2) (extrait de Oliveira et al., 2021)

3.3 Conclusion intermédiaire sur l'état de l'art : bilan, réflexion et perspectives

À la suite de cette mise à jour du recensement des indicateurs de circularité et de l'étude statistique, nous pouvons constater les tendances suivantes : croissance continue depuis 2010, répartition plutôt homogène sur les trois échelles micro/meso/macro, indicateurs principalement développés par des académiciens/chercheurs universitaires (quid de leur applicabilité et praticabilité questionnées dans les parties suivantes), indicateurs transversaux pour la plupart mais récente tendance à la spécification (p. ex. évolution du Material Circularity Indicator de la Foundation Ellen MacArthur pour le secteur du bâtiment), le recyclage est la boucle de l'économie circulaire la plus considérée/quantifiée, les liens entre circularité inhérente (ou intrinsèque) et conséquence environnementale/économique/sociale ne sont pas systématiques.

Notons encore que parmi les 105 jeux de c-indicateurs inventoriés et analysés, 52 sont des indicateurs uniques (principalement à l'échelle micro) et 53 regroupent plusieurs indicateurs (principalement à l'échelle macro). Dans des travaux futurs, il serait évidemment intéressant de pouvoir donner les indications suivantes (via un recoupement et analyse plus fine des indicateurs) : le nombre total d'indicateurs (individuels) issus des 105 jeux d'indicateurs (nous en comptons plus de 300 au sein de notre base de données, et le nombre total d'indicateurs « indépendants » (une fois les redondances considérées).

D'autres aspects à explorer, dont certains ont été mentionnés et questionnés lors du séminaire de restitution annuel SCORELCA 2021, incluent : la répartition des indicateurs et leur capacité à couvrir à la fois la technosphère et la biosphère de façon à refléter les enjeux de chacune des sphères ; des indicateurs de circularité pouvant se substituer à l'ACV (étude de corrélation/validation) ; indicateurs pour les entreprises sans expertise en éco-conception ou économie circulaire, i.e. indicateurs ne nécessitant pas de grosses ressources internes, mais qui permettent d'avancer dans le bon sens ; indicateurs de circularité plus spécifiquement pour le secteur des services (pour faire ressortir des flux de matière potentiellement cachés).

Plusieurs de ces aspects encore inexplorés de façon avancée ou synthétique, tel que le lien entre circularité et analyse de cycle de vie, seront abordés et approfondis dans les parties suivantes.

4 Partie 2 : Analyse approfondie de 10+ indicateurs

A la suite de l'état de l'art ayant permis le recensement des méthodes et indicateurs publiés, et qui a montré la grande diversité et hétérogénéité des approches, la partie 2 consiste à réaliser une analyse approfondie d'une dizaine d'indicateurs, *ad hoc* et complémentaires, parmi tous ceux recensés.

Pour cela, il faut réaliser séquentiellement les tâches suivantes :

- Définir une méthode de sélection de cette dizaine de c-indicateurs et réaliser la sélection ;
- Définir un format de fiche d'analyse d'après les critères principaux que l'on veut voir analyser ;
- Réaliser l'analyse suivant chacun des critères clés.

4.1 Méthode de sélection des 10+ indicateurs

Nous avons adopté une méthode empirique et pragmatique pour la sélection de la dizaine de c-indicateurs sur lesquels mener une analyse détaillée.

Le premier critère de tri adopté est celui du type de méthode : parmi les 105 « jeux d'indicateurs », certaines méthodes sont prescriptives (elles donnent des recommandations ou des lignes directrices, pour la conception de produits ou pour la conduite d'une stratégie d'économie circulaire de l'entreprise), d'autres sont des indicateurs (méthode de calcul pour la mesure). Pour cette étude, seuls sont conservés les indicateurs de mesure. Le second critère de tri est celui de la transparence (i.e. formule pour calculer l'indicateur disponible) de la méthode (ou indicateur), qui rejoint le critère de l'opérationnalité.

Une fois ces premiers tris effectués, nous avons opéré un tri en catégorisant :

- D'une part les attentes (besoins) des industriels membres de SCORELCA :
 - Besoin d'indicateurs sectoriels (spécifiques au secteur industriel)
 - Besoin d'indicateurs micro (à l'échelle des produits, des projets) et d'indicateurs méso (pour un reporting et pilotage à l'échelle de l'entreprise)
- Et d'autre part les caractéristiques objectives distinguant les indicateurs, telles que :
 - Indicateurs de recyclage/valorisation matière ;
 - Indicateurs de réutilisation produits ;
 - Indicateurs sur la circularité des matériaux/ressources à l'échelle du territoire ;
 - Indicateurs sur l'énergie ;
 - Indicateurs économiques ;
 - Indicateurs sociaux ;
 - Indicateurs de conception (pour la circularité) ;
 - Indicateur(s) agrégé(s) (« score » de circularité).

Le choix final d'un indicateur parmi l'ensemble correspondant (par exemple quel indicateur sur le recyclage choisir parmi tous les indicateurs portant sur le recyclage), jugé comme étant le « meilleur » indicateur, est *in fine* basé sur l'expertise de Michaël Saidani, et confronté à une discussion et validation auprès des industriels et partenaires SCORELCA ayant suivi ce projet.

Enfin, un dernier critère, permettant de « boucler » la sélection des indicateurs, est celui de la complétude du jeu d'indicateurs au regard des différents enjeux de l'économie circulaire.

Le synoptique illustrant la méthode de sélection est représenté au sein de la Figure 16.

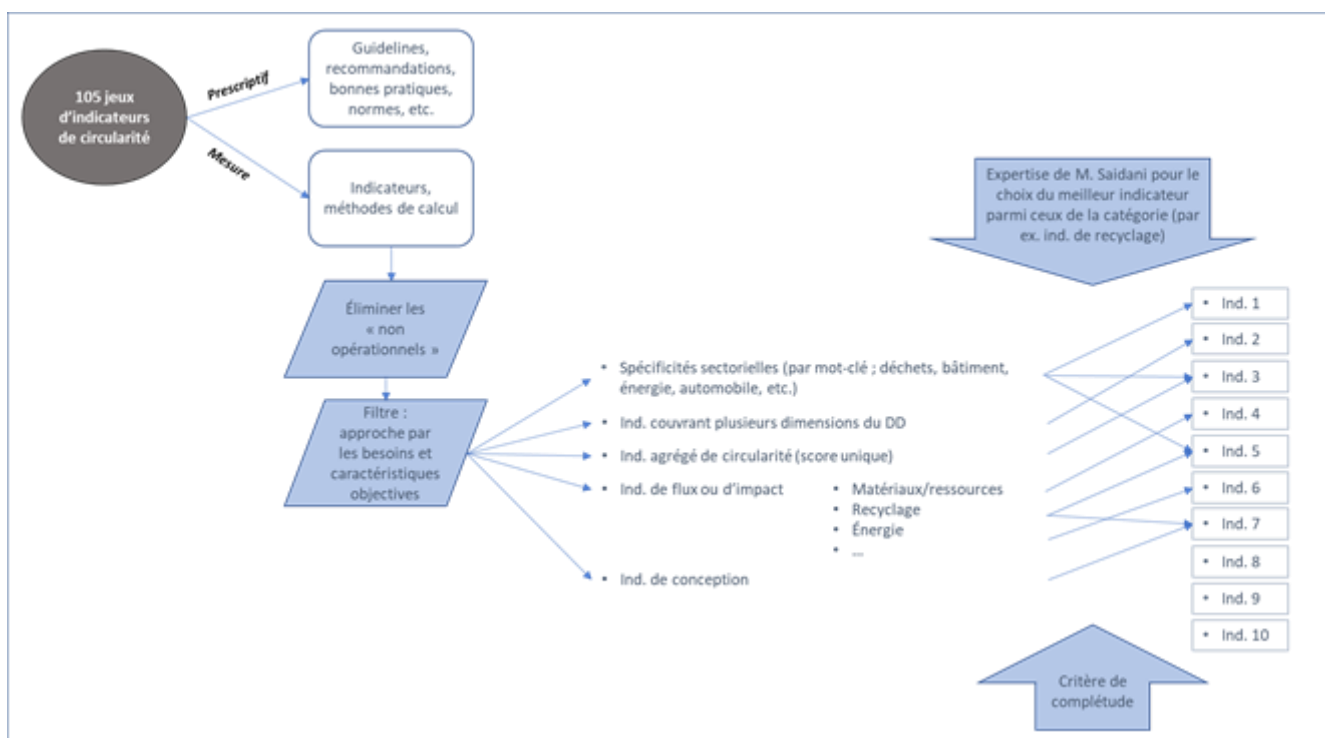


Figure 16 – Synoptique de la méthode de sélection des 10 indicateurs

4.2 Liste des indicateurs sélectionnés

Suivant le processus décrit à la sous-section précédente (méthode de sélection), est proposée ci-dessous une liste restreinte d'indicateurs classés selon les critères énoncés.

Deux indicateurs d'évaluation globale à l'échelle de l'entreprise : Circulytics et CTI

- Le *Circulytics* (outil de la Fondation Ellen MacArthur) : un outil qui vise à mesurer, via un jeu d'indicateurs, le degré de circularité d'une entreprise sur l'ensemble de ses activités. Onze thèmes sont étudiés. La circularité ainsi mesurée est classée en deux catégories : les potentiels (enablers), i.e. quels sont les leviers activés par l'entreprise pour l'EC, et les résultats (outcomes), i.e. la mesure des actions engagées sur les intrants, les matériaux, l'énergie, la réparabilité des produits, etc.).
- Le *Circular Transition Indicators* (CTI) : un outil en ligne, d'auto-évaluation de la performance de circularité d'une entreprise. Le CTI calcule dans quelle mesure une entreprise est capable de garantir des boucles de circularité de la matière dans la chaîne de valeur. La performance de circularité est une moyenne entre les pourcentages de flux entrants "circulaires" et le pourcentage de flux sortants "circulaires". Le CTI propose 3 modules : "boucler la boucle", "optimiser la boucle", et "valoriser la boucle".

Deux indicateurs d'évaluation de la circularité au niveau matière et produit manufacturé : MCI et PCI

- Le *Material Circularity Indicator* (MCI) : développé par la Fondation Ellen MacArthur, est un score (compris entre 0 et 1) exprimant la recirculation de la matière. Il combine des critères de durée de vie et d'intensité d'utilisation avec des critères de contenu en matière recyclée et de recyclabilité du produit.
- Le *Product Circularity Indicator* (PCI) : un indicateur agrégé traduisant la recirculation du produit. Il a été développé comme une version augmentée du MCI.

Un indicateur d'aide à la conception (circularité potentielle) : CCET (et deux alternatives : CEIP, CPI)

- Le *Concept Circularity Evaluation Tool* (CCET) : vise à évaluer le potentiel des produits en développement dans les premières phases du processus de conception.
- Le *Circular Economy Indicator Prototype* (CEIP) : un questionnaire en 15 questions pour évaluer la performance des produits. Nécessite d'avoir accès à la nomenclature produit (BOM).
- Le *Circularity Potential Indicator* (CPI) : vise à évaluer la circularité potentielle des produits via un questionnaire portant sur 20 attributs groupés en 4 blocs (tels que définis par la Fondation Ellen MacArthur).

Un indicateur de réutilisation/réemploi : *Reuse Potential Indicator* (RPI)

- Le *Reuse Potential Indicator* (RPI) indique dans quelle mesure une matière doit être considérée plutôt comme une ressource ou comme un déchet en tenant compte des technologies disponibles.

Un jeu de 3 indicateurs de flux matière de type MFA : *End-of-Life Recycling Rates* (EoL-RRs)

- *End-of-Life Recycling Rate* (EoL-RR) : exprime la performance du recyclage via la proportion de matières réellement recyclées.
- *Recycled Content* (RC) : donne la part de matières "secondaires" dans le total des matières entrant dans un produit.
- *Old Scrap Ratio* (OSR) : donne la part de la fraction de matière recyclée dans le flux de recyclage.

Un indicateur de flux d'énergie : *CI et Qc*

- Le *Circularity Index* (CI) : exprimé par un score de la manière suivante :
 - $CI = F = \alpha\beta$, avec $\max(CI) = 1$
 - α = matière valorisée en fin de vie / demande totale en matière
 - $\beta = 1 - \text{énergie nécessaire pour la valorisation de la matière} / \text{énergie nécessaire pour la production primaire}$
- le *Circularity of Material Quality* (Qc) : ratio qui prend en compte la qualité du recyclage via un bilan de masse et la présence de substances (lien avec *exergy* et *embodied energy*) :
 - numérateur : économies nettes d'énergie dues au recyclage de la matière (MJ/kg)
 - dénominateur : contenu énergétique de la matière (MJ/kg)

Un jeu d'indicateurs pour la circularité à l'échelle d'un territoire : *RMFCE* (et une alternative spécifique à l'échelle d'un éco-parc industriel : *IPCEIS*)

- *Regional Material Flow tools for the Circular Economy* (RMFCE) : ligne 97 de la BdD
- *Industrial Park Circular Economy Indicator System* (IPCEIS) : ligne 62 de la BdD

Deux indicateurs d'impacts environnementaux en lien avec l'ACV : *RBR* et *RCBR*

- Le *Recycle Benefit Rate* (RBR) et le *Recycled Content Benefit Rate* (RCBR) : tous deux indiquent les bénéfices environnementaux potentiels du recyclage comparés au non-recyclage (incinération ou enfouissement), selon une approche cycle de vie.

Des indicateur(s) d'impacts socio-économiques (en lien avec *LCC* et *SLCA*): *SEI-EoL*, *TCR* et *TCO* (et un indicateur de circularité économique spécifique à l'échelle du produit : *PCM*)

- Le *Socio-economic Indicator for EoL Strategies for Bio-based Products* (SEI-EoL) vise à identifier le meilleur procédé de fin de vie à appliquer à un produit biosourcé en tenant compte de l'impact socio-économique. Il est développé à partir d'un modèle intégré de processus de hiérarchie analytique et d'analyse décisionnelle multicritères (AHP-MCDA) basé sur la participation d'experts, et est capable de mesurer et de comparer la performance socio-économique des alternatives fin de vie pour les produits biosourcés. Le SEI-EoL fournit une

valeur finale pour chaque option de fin de vie selon une base de 25 critères relatifs aux travailleurs, aux consommateurs, à la société en général, à la communauté locale et aux acteurs de la chaîne de valeur.

- Total Circular Revenue (TCR), Total Cost of Ownership (TCO)
- Le *Product-level Circularity Metric* (PCM) : exprime la recirculation de la valeur économique basée sur la recirculation des matières
 - Formule : $C = \text{valeur économique des parties du produit en recirculation} / \text{valeur économique de toutes les parties}$; Où C est la fraction d'un produit venant de produits usagés (boucles fermées et ouvertes)

Remarque : Ces indicateurs peuvent être complétés par : (i) des indicateurs spécifiques à des secteurs industriels (normes, réglementations, etc.), par exemple pour Renault, secteur automobile : Directive 2000/53/EC sur les véhicules en fin de vie avec le pourcentage de recyclage atteint en fin de vie ; (ii) des indicateurs d'ACV (voir section suivante).

Tableau de synthèse des indicateurs de circularité pré-sélectionnés (Figure 17) :

- Afin de conserver le nombre maximal de 10 fiches, il est proposé de regrouper les indicateurs par "catégorie" (les indicateurs liés sont synthétisés au sein d'une même fiche) :

Catégories	Indicateurs	Acronymes	Outils associés
Fiche 1 : Performance globale (corporate reporting, à l'échelle de l'entreprise)	Circulytics	Circulytics	Web-based
	Circular Transition Indicators	CTI	Web-based
Fiche 2 : Evaluation de la circularité au niveau matière	Material Circularity Indicator	MCI	Excel
Fiche 3 : Evaluation de la circularité au niveau produit manufacturé	Product Circularity Indicator	PCI	Excel
Fiche 4 : Aide à la conception (circularité potentielle)	Concept Circularity Evaluation Tool	CCET	Excel
Fiche 5 : Réutilisation/Réemploi	Reuse Potential Indicator	RPI	Formules
Fiche 6 : Flux matière (type MFA)	End-of-Life Recycling Rate Recycled Content Old Scrap Ratio	EoL-RR RC OSR	Formules
Fiche 7 : Flux d'énergie	Circularity Index	CI	Formules
	Circularity of Material Quality	Qc	Formules
Fiche 8 : Circularité d'un territoire	Regional Material Flow tools for the Circular Economy	RMFCE	Formules Template Excel
Fiche 9 : Impacts environnementaux (hors ACV)	Recycle Benefit Rate Recycled Content Benefit Rate	RBR RCBR	Formules
Fiche 10 : Impacts socio-économiques	Socio-economic Indicator for EoL Strategies for Bio-based Products	SEI-EoL	Formules
	Total Circular Revenue	TCR	
	Total Cost of Ownership	TCO	

Figure 17 – 10 fiches associées aux indicateurs de circularité sélectionnés

4.3 Format de fiche pour la description des indicateurs de circularité

Les indicateurs sélectionnés sont transposés dans des fiches indicateurs autoportantes. Inspirées de fiches existantes et publiées dans la littérature (voir Figures 18 et 19), les nouvelles fiches ont été développées (complétées et illustrées) dans un souci didactique.

Ces fiches originales sont constituées de différentes rubriques reprenant notamment les critères de classification énoncés dans la Partie 1. Les fiches « c-indicateurs » présentent ainsi le contenu suivant, de manière synthétique, pour chaque indicateur :

- Problématique à laquelle l'indicateur répond
- Méthodologie sous-jacente à l'indicateur
- Résultats qu'il produit
- Secteur(s) dans lequel il est utilisé
- Exemples issus de la bibliographie et/ou cas d'étude
- Analyse de son lien avec l'ACV
- Analyse de la convergence entre la performance en matière de circularité et la performance en matière environnementale (notamment sur une base ACV)
- Couverture des aspects économiques et sociaux
- Eventuelles limites ou restrictions
- Potentiel d'évolution de cet indicateur

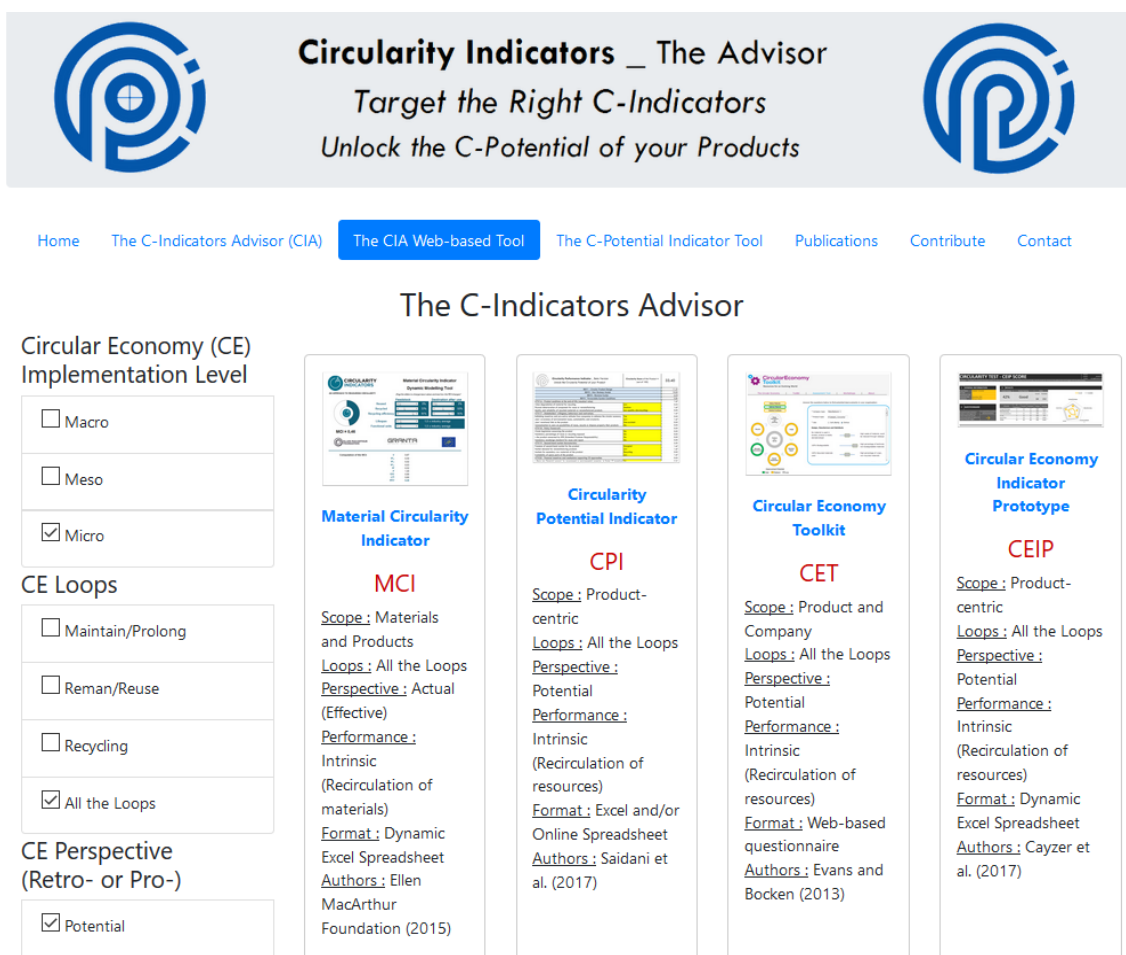


Figure 18 – Exemple de fiches simples « c-indicateurs », <http://www.circulareconomyindicators.com>

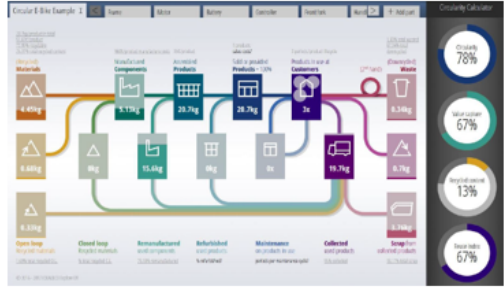
C-indicator/tool name	Circularity Calculator (CC)
Short description	Quickly compare the potential of different circular design strategies
Working principle – Assessment method	Modélisation, visualization and evaluation of material flows and the financial value of closing loops
CE level of implementation	Micro
Object of assessment	Product service system and business
C-loops considered	Remanufacturing, reuse and recycling
Where/when to apply	Project scoping, definition and product design phases
Time needed	Two to four hours, once data are available
C-perspective (pro- or retro-)	Potential
C-performance (intrinsic or consequential)	Both
Units – Measurability	Quantitative (%)
Dimensionality	4 performance indicators: overall product circularity, potential value capture, recycled content, reuse index
Data required, availability, providers	BoM, costs of materials, production and sales, potential part of reuse, remanufacturing and recycling
Possible usages	To inform strategic decisions and design requirements, before costly investments or consequential decisions have been made, to compare different circular design scenarios, used by cross-department product development teams
Influenced by stakeholders	Design and business decisions
Stakeholders impacted	Designers working in the fuzzy front end of product development (to help)
Transversality (generic, sector-specific)	Could be apply to a wide variety of products, services
Associated tool	Computerized assessment tool
Source – Reference	ResCoM project*, 2017
Access link	http://www.rescoms.eu/platform-and-tools
Illustration - Snapshot	 <p>The screenshot shows the Circularity Calculator interface. It features a central material flow diagram with various components and their weights. On the right side, there are four circular gauges displaying performance indicators: Circularity (78%), Material reuse (67%), Recycled content (13%), and Value added (67%). The interface includes a menu bar at the top and a toolbar on the right.</p>

Figure 19 – Exemple d'une factsheet « c-indicator » plus détaillée (Saidani, 2018)

Ci-après (Figure 20) le nouveau modèle de fiche. Les autres fiches sont disponibles en Annexe 3, et dans le format natif (PPT) pour les membres SCORELCA ("Fiche_C-indicateur_#_Nom"), ou sur demande.

acronyme Fiche #	CATEGORIE Nom de l'indicateur (FR) (Nom de l'indicateur (EN))		
Source :			
PRÉSENTATION			
EXPRESSION ET CALCUL			
PARAMÈTRES À RENSEIGNER (optionel)			
acronyme Fiche #			
CATEGORIE Nom de l'indicateur (FR) (Nom de l'indicateur (EN))			
DONNÉES REQUISES			
FINALITÉ DE L'INDICATEUR			
Perspective de circularité <ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	Usage (destination) <ul style="list-style-type: none"> • Information • Prise de décision • Communication • Education 	Transversalité de l'application <ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	Performance évaluée <ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)
PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT			
Niveaux de mise en oeuvre <ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	Taille de la boucle <ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	Étapes du cycle de vie impliquées <ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	Sphère de l'économie circulaire concernée <ul style="list-style-type: none"> • Technosphère • Biosphère
TRANSPARENCE			
Crédits : & pour SCORELCA – 2021 1/3			
Crédits : & pour SCORELCA – 2021 2/3			

acronyme Fiche #	CATEGORIE Nom de l'indicateur (FR) (Nom de l'indicateur (EN))
POINTS FORTS ET LIMITES	
+	-
POPULARITÉ	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; border: 1px solid #0056b3;">Reconnu</div> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; border: 1px solid #0056b3;">Intermédiaire</div> <div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; border: 1px solid #0056b3;">Marginal</div> </div>	
MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR	
CAS D'APPLICATION	
LIEN AVEC L'ACV	
Crédits : & pour SCORELCA – 2021 3/3	

Figure 20 – Modèle de fiche c-indicateur proposé

5 Partie 3 : Liens avec l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Plusieurs liens entre indicateurs de circularité et analyse de cycle de vie ont déjà été mentionnés et illustrés dans les parties précédentes : p. ex., sur la partie 1, le mapping de c-indicateurs sur les trois piliers du développement durable ; sur la partie 2, des liens avec l'ACV et cas d'application sont donnés dans les fiches indicateurs lorsque disponibles.

Alors que nous adoptons le postulat que l'économie circulaire reste (ou doit rester) un moyen pour atteindre les objectifs environnementaux, sociétaux et économiques du développement durable, il serait notamment intéressant de voir quand la circularité va et ne va pas dans le sens du développement durable et quels paramètres (dans les boucles) sont critiques.

Sur cette partie (3), le but n'est pas d'être le plus exhaustif possible (contrairement aux benchmark et détail des CI, parties 1 et 2) mais d'illustrer les différentes synergies et/ou conflits (compromis ou *tradeoffs* en anglais) possibles entre LCA et CI, et cela de façon pratique (avec des exemples concrets) pour les membres SCORELCA, comme illustré de manière schématique sur le graphe bi-dimensionnel de la Figure 21.

On peut *a priori* imaginer 3 pistes à explorer sur les liens ACV/indicateurs de circularité :

- Les données de sortie de l'ACV (flux/mid/endpoints) sont utilisées comme données d'entrée pour le calcul d'indicateurs de circularité ;
- Un/des indicateurs de circularité sont intégrés en données de sortie de l'ACV sous forme d'indicateur flux midpoint/endpoint ;
- L'ACV est utilisée pour vérifier le bien-fondé d'un jeu d'indicateurs de circularité (à valider sur des produits connus, pour gagner du temps par rapport à la réalisation d'une ACV)

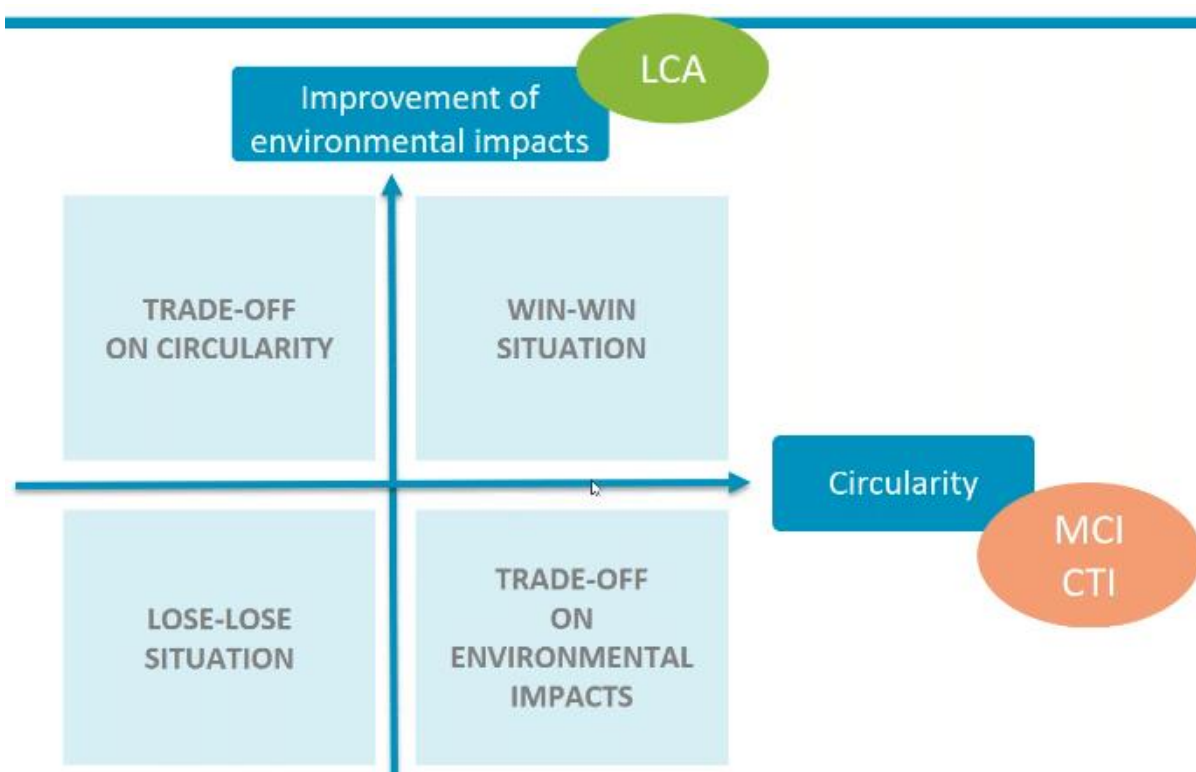


Figure 21 – Compromis potentiel entre ACV et circularité. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA

5.1 Comparaison ACV/EC via des cas d'étude de la littérature

Pour apporter un nouvel éclairage à la question "Les indicateurs de circularité et l'ACV fournissent-ils les mêmes résultats dans l'évaluation des stratégies circulaires ?", le CIRAIG (Polytechnique Montréal) a comparé les indicateurs de circularité et d'analyse du cycle de vie pour les stratégies d'économie circulaire sur deux études de cas industrielles : (i) l'augmentation de la circularité pour une entreprise de produits plastiques (étude de cas #1), (ii) les deux options principales de revalorisation pour des pneus usagés (étude de cas #2).

L'objectif de l'étude de cas #1 est d'évaluer la pertinence environnementale des initiatives et des stratégies pour améliorer la circularité d'une entreprise de produits plastiques : proposition de stratégies de circularité et de scénarios pour améliorer le score de circularité (MCI et CTI), évaluation du cycle de vie organisationnel et évaluation de la circularité pour mieux comprendre le lien entre la maximisation de la circularité et la minimisation des impacts du cycle de vie.

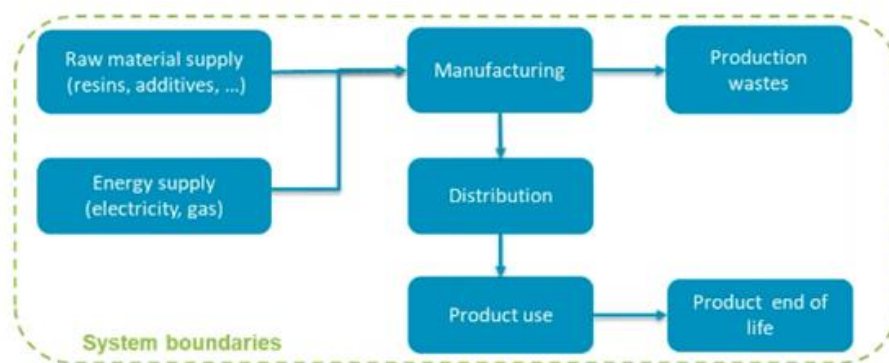


Figure 22 – Frontière du système pour le cas d'étude #1. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA

Circularity strategies:

1. Baseline
2. Improving recycled content
3. Applying a closed loop business model
4. Using a blend of fossil and biobased resins (PE & TPS)
5. Using only biobased resins (bioPE)
6. Using biodegradable biobased resins (PHA and TPS) with current end of life (more than 80% landfilling)
7. Using biodegradable biobased resins (PHA and TPS) and ensuring composting at the end of life

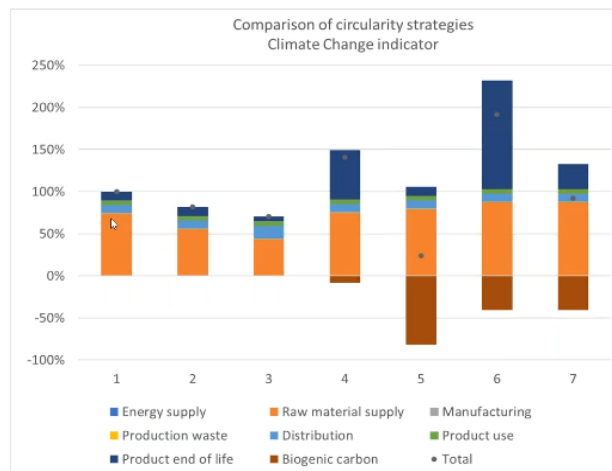


Figure 23 – Impact carbone des stratégies circulaires. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA

Strategies	% circular inflow	% circular outflow	% circularity
1	3,9%	1,8%	2,8%
2	50,0%	1,8%	25,9%
3	52,8%	42,8%	47,8%
4	33,3%	1,9%	17,6%
5	89,6%	1,8%	45,7%
6	89,6%	2,2%	45,9%
7	89,6%	90,1%	90,2%

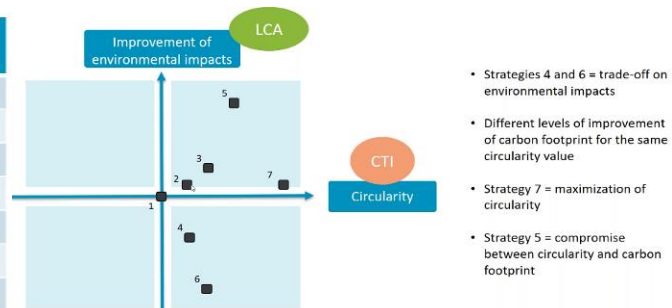


Figure 24 – Score de circularité (CTI) et compromis environnementaux. Source : Saunier, 2019, Webinar ACLCA

Comme l'illustrent les Figures 22, 23 et 24 sur le cas d'étude #1, alors que les six stratégies d'économie circulaire permettent d'augmenter sensiblement le score de circularité (dans différentes proportions), seules quatre de ces stratégies (2, 3, 5, et 7) permettent d'engendrer des bénéfices environnementaux (réduction de l'empreinte carbone). Sur ce cas d'étude, il n'y a pas de corrélation claire entre les deux indicateurs.

Pour l'étude de cas #2, Lonca et al. (2018) ont utilisé l'ACV et le MCI pour évaluer le potentiel des stratégies de gestion des pneus usagés pour (i) éviter le transfert de charge, et (ii) améliorer la circularité des matériaux. Les résultats des deux études de cas donnent un bon aperçu aux fabricants de pneus sur la façon de gérer les pneus usagés pour mieux contribuer à l'objectif de l'EC. L'étude révèle que le MCI est pertinent pour soutenir la conception circulaire afin de préserver les matériaux spécifiques qui composent le produit. Mais l'ACV fournit une perspective complémentaire sur une portée plus large en termes de limites du système et d'indicateurs complémentaires nécessaires pour mesurer l'impact sur la pollution - aidant ainsi à éviter le transfert de charge, comme illustré dans les Figures 25 et 26.

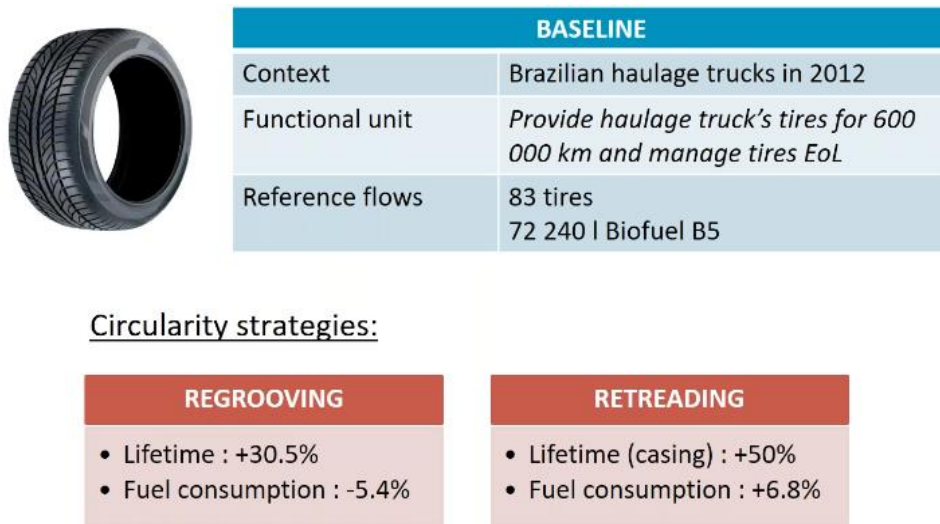


Figure 25 – Description du cas d'étude #2. Sources : Saunier, 2019, Webinar ACLCA ; Lonca et al., 2018.

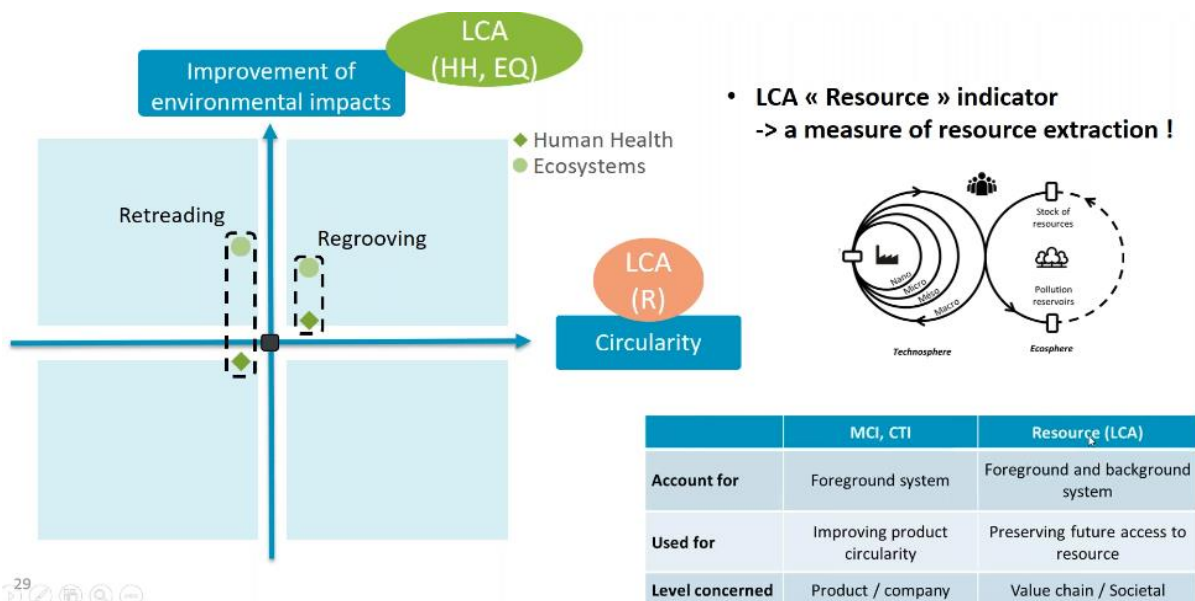


Figure 26 – Résultats pour le cas d'étude #2. Sources : Saunier, 2019, Webinar ACLCA ; Lonca et al., 2018.

5.2 Considérations générales sur les indicateurs

D'une part, l'EC se concentre sur le maintien (la préservation et l'augmentation) de la valeur des ressources pour l'économie. Ce faisant, l'EC considère également différents niveaux d'application : au niveau macro, elle se concentre sur les échanges de matières entre l'économie et l'environnement, ainsi qu'au niveau international ; au niveau structurel ou méso, l'accent est mis sur les flux de matières dans les systèmes industriels, en distinguant non seulement les catégories de matières, mais aussi les secteurs et les branches industrielles ; au niveau micro ou commercial, elle se concentre sur les entreprises et leurs produits. Les stratégies d'EC partent souvent du principe qu'il est toujours bon de conserver les ressources individuelles dans l'économie, soit en les utilisant le plus longtemps possible, soit en les faisant passer par des boucles de cycles techniques ou biologiques (Pena et al., 2021).

D'autre part, l'ACV se concentre principalement sur le niveau du produit et sur tous les impacts associés au cycle de vie du produit, c'est-à-dire non seulement sur les impacts liés à l'utilisation des matériaux et des ressources, mais aussi sur tous les impacts qui peuvent être pertinents pour une catégorie de produits. L'ACV ne préconise aucune stratégie spécifique, mais fournit simplement un cadre d'évaluation pour comprendre les implications environnementales, sociales et économiques de différentes options pour fournir une fonction ou un service. De cette façon, l'ACV peut servir de méthodologie scientifique pour quantifier les avantages ou inconvénients de stratégies spécifiques d'EC, et aussi les occasions où le maintien des ressources dans l'économie pendant plus longtemps peut être contre-productif (par exemple, en raison des coûts d'élimination des substances toxiques contaminant ces ressources) (Pena et al., 2021).

Au total, les avantages de la combinaison des indicateurs d'économie circulaire avec l'analyse du cycle de vie sont les suivants : identifier les compromis environnementaux des choix de circularité, élargir l'analyse environnementale avec l'ACV. Cependant, dans certains cas, les principes de l'économie circulaire (ou l'application de stratégies d'économie circulaire) et les résultats de l'analyse du cycle de vie peuvent conduire à des conclusions opposées. L'économie circulaire encourage le recyclage (sans poser de questions), alors que selon l'analyse du cycle de vie, la valorisation énergétique est parfois plus bénéfique. Les approches habituelles de fin de vie sont souvent contraires aux principes qui guident l'économie circulaire. De plus, l'ACV n'a pas encore toutes les réponses lorsqu'il s'agit de projets d'économie circulaire. Par exemple, les pertes dissipatives des matières premières sont à peine prises en compte par les indicateurs standards d'épuisement des ressources. De même, le downcycling et le upcycling ne sont pas simples à évaluer (Quantis, 2017). Enfin, les lacunes actuelles en matière de recherche concernent les méthodes de représentation conjointe et la manière dont les résultats sont affectés par les différences et les limites méthodologiques (par exemple, l'approche d'attribution de la fin de vie (coupure, expansion du système, approche hybride), l'approche conséquentielle par opposition à l'approche attributionnelle (effets de rebond sur d'autres acteurs et parties du système), ou l'évaluation de la perte de qualité des matériaux secondaires).

En termes généraux, on peut souligner que (Pena et al., 2021) :

- L'EC donne la priorité à l'utilisation continue des ressources. Cela implique le maintien du plus haut niveau de fonctionnalité des matériaux par le biais du recyclage, soit au sein de l'économie, généralement par le biais d'un réseau de secteurs industriels, soit dans les processus naturels de l'écosystème, et peut impliquer l'extension de la durée de vie des produits pour minimiser le besoin d'activités de recyclage gaspilleuses.
- Les méthodologies et les cadres pour l'EC et les indicateurs d'évaluation de la circularité sont en cours de développement et visent principalement à augmenter la valeur perçue en augmentant la valeur d'utilité des ressources dans l'économie.
- L'ACV peut être utilisée pour mesurer et évaluer la performance environnementale (et éventuellement sociale, via l'ACVS) d'un système défini dans une économie circulaire, afin de garantir une prise de décision optimale.
- L'ACV est une méthodologie bien établie et normalisée, adoptée par l'industrie dans le monde entier, qui permet de caractériser la performance environnementale d'un système de produits, non seulement par rapport à l'impact associé à l'utilisation des ressources, mais aussi par rapport à l'ensemble des catégories d'impact pertinentes tout au long du cycle de vie du produit.

6 Conclusion et perspectives

Identifier, sélectionner et déployer les indicateurs de circularité les plus appropriés est essentiel pour à la fois évaluer et améliorer la performance des produits, des entreprises et des régions dans une perspective d'économie circulaire et soutenable. Cette étude propose une classification des plus de 100 jeux d'indicateurs de circularité (N = 105). Ces indicateurs ont été analysés et différenciés suivant 15 catégories, et critères associés, qui permettent d'orienter les utilisateurs vers le jeu d'indicateurs le plus propice à une situation ou besoin donné. Particulièrement, une méthodologie de sélection d'un jeu complet d'indicateurs de circularité a été développée et mise en application pour, au final préconiser un jeu de 10 indicateurs de circularité. Ce groupe de c-indicateurs a été analysé en détail et de façon illustrée via des fiches pratiques et synthétiques. De plus, des parallèles (ponts et fossés actuels) entre ACV et c-circularité ont été discutés de façon théorique et pratique, au travers de différents cas d'études illustratifs et quantifiés.

Les différentes contributions, analyses et recommandations, par exemple, la base de données de plus d'une centaine d'indicateurs de circularité, peuvent servir de fondement solide pour recombinaison des indicateurs sur la base de leur complémentarité, ainsi que pour les enrichir de leurs spécificités respectives pour construire de nouveaux indicateurs répondant aux problématiques d'industriels valorisant davantage l'analyse de cycle de vie. En pratique, la méthodologie de sélection d'indicateurs de circularité, couplée au graphe bi-dimensionnel performance de circularité et impacts environnementaux, peut servir de modèle pour développer un jeu d'indicateurs, couplé à un tableau de bord, permettant de rendre compte de l'impact environnemental (lien avec l'ACV) direct et indirect (externalités) d'un projet, du potentiel de circularité des projets en phase amont et de piloter le projet en phase d'exécution. Les résultats issus de ce projet pourront également servir de contribution à la normalisation à l'ISO/TC 323 (voir Figure 27), et une présentation de ces résultats au sein du groupe miroir « GT Metrics » de la Commission AFNOR X30M est également une perspective. Le comité technique économie circulaire, piloté par Catherine Chevauché (Groupe Suez) et Olivier Cartigny (AFNOR), a pour objectif la normalisation dans le domaine de l'économie circulaire en vue d'élaborer des cadres de références, des recommandations, des outils d'aide et des exigences pour la mise en œuvre des activités de toutes les organisations impliquées afin de maximiser la contribution au développement durable.

Le comité technique économie circulaire (ISO TC 323)

LE PROGRAMME DE TRAVAIL



Figure 27 – Groupes de travail en cours pour une série de normes ISO sur la circularité. Source : AFNOR

Afin d'aider l'utilisateur dans la sélection d'indicateurs appropriés, un outil de requête a été développé (Saidani et al., 2019) dans le but de rendre cette taxonomie plus facilement exploitable et opérationnelle pour, par exemple, des organisations travaillant sur des projets et stratégies de développement en lien avec l'économie circulaire et étant à la recherche d'indicateurs de pilotage. Cet

outil est destiné aussi bien aux praticiens industriels (concepteurs de produits, ingénieurs en bureau d'études) qu'aux décideurs (gestionnaires de projets, responsables financiers). Par souci de simplicité d'utilisation et de diffusion, l'outil est développé sur Microsoft Excel avec l'utilisation de macros (voir Figure 28). L'outil de selection est flexible et sera mis à jour avec les nouveaux c-indicateurs. Une version internet de cet outil est également disponible : la plateforme « The C-indicators Advisor (CIA) » (<http://www.circulareconomyindicators.com/>) est une plateforme en ligne de portée internationale développée par CentraleSupélec pour à la fois sélectionner et mettre en œuvre le(s) bon(s) indicateur(s) d'économie circulaire et débloquent et suivre les performances de circularité de vos produits. C'est une plateforme gratuite mais qui demande une inscription volontaire. Sur demande, il serait possible de développer un volet (minimaliste) « 10+ indicateurs SCORELCA » sur le panel d'accueil de la plateforme « The C-indicators Advisor (CIA) » pour mettre à disposition, de manière minimaliste, les résultats du présent projet. L'objectif serait ici de faciliter l'accessibilité et la compréhension de ces 10+ indicateurs avec un accès direct à la fiche illustrée.

N.B. : L'état de l'art a été clôturé en décembre 2020. D'autres indicateurs ont vu le jour depuis début 2021, et continuent d'être développés en France et à l'international, pour pallier certains manques identifiés dans la partie 1 (spécificité, boucles de l'EC autres que le recyclage, etc.) comme l'indice de réparabilité détaillé en Annexe 4.

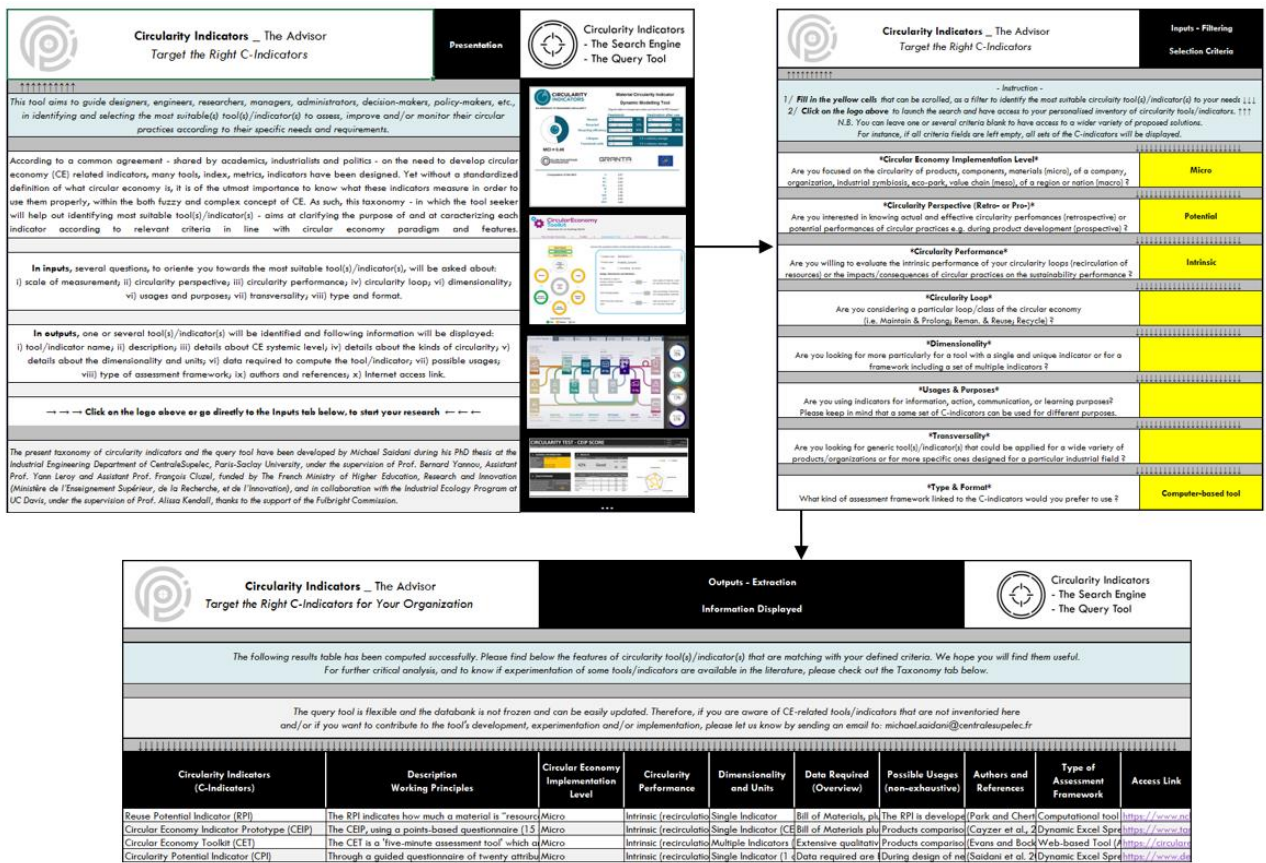


Figure 28 – The Circularity Indicators Advisor (Saidani et al., 2019). Format : Excel.

Cadran en haut à gauche: présentation de l'outil
 Cadran en haut à droite: critères de sélection (à compléter)
 Cadran du bas : sélection des indicateurs appropriés (automatique)

7 Bibliographie

L'ensemble des références bibliographiques recensées dans le cadre de l'étude (105 références) est listé dans le fichier Excel en annexe.

Toutefois, quelques références jugées clés dans le cadre de l'étude sont rappelées ci-dessous :

- ACLCA Webinar. (2019) Explore the use of LCA to better inform decision making in a circular economy context. CIRAIG, Francois Saunier.
- de Oliveira, C. T., Dantas, T. E. T., & Soares, S. R. (2020). Nano and Micro Level Circular Economy Indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 26, April 2021, Pages 455-468.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Circularity Indicators – An Approach to Measure Circularity. Methodology & Project Overview*. Cowes, UK.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy– A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232.
- Kristensen, H. S., & Mosgaard, M. A. (2020). A review of micro level indicators for a circular economy–moving away from the three dimensions of sustainability?. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118531
- Lonca, G., Muggéo, R., Tétréault-Imbeault, H., Bernard, S., & Margni, M. (2018). A bi-dimensional assessment to measure the performance of circular economy: a case study of tires end-of-life management. In *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies* (pp. 33-42). Springer, Cham.
- Pena, C., Civit, B., Gallego-Schmid, A., Druckman, A., Caldeira-Pires, A., Weidema, B., ... & Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2), 215-220.
- Roos Lindgreen, E., Salomone, R., & Reyes, T. (2020). A critical review of academic approaches, methods and tools to assess circular economy at the micro level. *Sustainability*, 12(12), 4973.
- Saidani, M. (2018). *Monitoring and advancing the circular economy transition – Circularity indicators and tools applied to the heavy vehicle industry*. PhD Thesis, Université Paris-Saclay.
- Saidani, M., Cluzel, F., Leroy, Y., Yannou, B. (2019). Des indicateurs catalyseurs de l'économie circulaire ? *Revue Technologie et Innovation*, Vol. 19, pp. 1-19.
- Saidani, M., Kendall, A., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F. (2019). Closing the loop on platinum from catalytic converters: Contributions from material flow analysis and circularity indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 23 (5), 1143-1158.
- Saidani, M., Kim, H., Cluzel, F., Leroy, Y., Yannou, B. (2020). Product circularity indicators: what contributions in designing for a circular economy? *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, DESIGN2020*, 1, 2129-2138, Oct. 2020, Dubrovnik, Croatia.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2017). How to assess product performance in the circular economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. *Recycling*, 2(1), 6.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 207, pp. 542-559.
- SCORELCA. (2015). *Circular Economy: Concepts and Evaluation Methods*. SCORELCA, Villeurbanne, France. Study N° 2014-02.
- SCORELCA. (2019). *Boucles matière, boucles produites et ACV*. SCORELCA, Villeurbanne, France. Study N° 2018-02.

8 Annexes

8.1 Annexe 1 : Liste des contributions et livrables associés

- 1 rapport de lancement (présenté sous forme de diapositives) ;
- 1 rapport intermédiaire (présenté sous forme de diapositives) ;
- 1 rapport final (document présent) ;
- 1 animation d'un webinar d'une heure pour les membres, à la fin du projet ;
- 1 jeu de transparents présentant les principaux enseignements de l'étude ;
- 1 synthèse scientifique (résumé + contenu scientifique détaillé de l'étude) en français ;
- 1 synthèse scientifique (résumé + contenu scientifique détaillé de l'étude) en anglais ;
- 1 base de données de 105 jeux d'indicateurs de circularité, au format Excel ;
- 10 fiches « c-indicateurs » ;
- Plusieurs entretiens avec les membres SCORELCA ;
- Mise à jour de l'outil Excel et en ligne « Circularity Indicators Advisor » ;
- 1 présentation au séminaire de restitution annuel SCORELCA 2021 ;
- 1 abstract soumis à la conférence international LCM2021 on Life Cycle Management.

8.2 Annexe 2 : Présentation des parties prenantes

SCORELCA



SCORELCA est une association qui vise à promouvoir et à organiser une collaboration entre les acteurs industriels, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution positive, partagée et reconnue aux niveaux européen et international des méthodes de quantification environnementales globales, en particulier de l'analyse du cycle de vie (ACV), et de leur mise en pratique.



EVEA, expert de l'ACV appliquée

EVEA est aujourd'hui un des acteurs de référence en France en matière d'ACV :

- De nombreuses ACV réalisées dans le respect des normes ISO 14040 et ISO 14044, et ayant fait l'objet de revues critiques par des organismes de renommée internationale, tel le CIRAIG ou l'ESU, des institutionnels comme l'ADEME, des centres de compétence (IFP Energies Nouvelles, IRSTEA, ...).
- Une utilisation des ACV dans des contextes très diversifiés, donnant à EVEA une vision large des applications sectorielles des ACV et des acteurs dans le champ de cette discipline
- L'« industrialisation de l'ACV » dans les entreprises, dans le cadre de projets pilotés par les Directions Informatique, Achat ou Industrielle : conception et mise en place d'outils d'ACV et de bases de données pérennes
- De nombreuses revues critiques d'ACV réalisées, permettant à EVEA d'avoir une vision large sur la diversité des pratiques d'ACV au sein de la communauté
- Le développement d'outils informatiques spécifiques dont notamment le couplage direct de logiciel d'ACV avec d'autres logiciels (ERP, Plateforme web, ...)
- Participation à des programmes de recherche (Fondation 2019, COMETHE, IAR-ACV, ORGABREAD, Salinalgues, VENTEEA, Voilier du futur, Compofast, Humevere, Compamed ZNA, ACDV.). EVEA travaille conjointement avec les institutionnels sur de nombreux projets de recherche FUI, ANR, AMI. Et **EVEA est accrédité au titre du Crédit Impôt Recherche par le Ministère de la Recherche.**



CentraleSupélec

CentraleSupélec

CentraleSupélec (CS) est un établissement Public à caractère scientifique, culturel et professionnel, né en janvier 2015 du rapprochement de l'École Centrale Paris et de Supélec. Aujourd'hui, CentraleSupélec se compose de 3 campus en France (Paris-Saclay, Metz et Rennes). Elle compte 4300 étudiants, dont 3200 élèves ingénieurs, et regroupe 16 laboratoires ou équipes de recherche. Fortement internationalisée (30% de ses étudiants et près d'un quart de son corps enseignant internationaux), l'école a noué plus de 170 partenariats avec les meilleures institutions mondiales. Ecole leader dans l'enseignement supérieur et la recherche, CentraleSupélec constitue un pôle de référence dans le domaine des sciences de l'ingénierie et des systèmes, classée parmi les meilleures institutions mondiales. Elle est membre-fondateur de l'**Université Paris-Saclay**, classée 14^{ème} pour sa première apparition au classement de Shanghai en 2020 et préside le Groupe des Ecoles Centrale (Lyon, Lille, Nantes et Marseille), qui opère les implantations internationales (Pékin (Chine), Hyderabad (Inde), Casablanca (Maroc)).

Le Génie Industriel est la science du diagnostic, de la modélisation, de la simulation, de la conception, de l'exploitation et de la conduite du changement des systèmes d'activités des organisations (notamment des entreprises). Le Laboratoire Génie Industriel (LGI) a donc pour objets d'étude (1) les systèmes de produits-services mis sur le marché par les entreprises et (b) les systèmes de production ou d'activité des entreprises. Ces systèmes, et les processus qui en découlent, sont déclinés tout au long de leur cycle de vie. Il s'agit de savoir les observer, diagnostiquer, concevoir ou améliorer, opérer (exploiter, réguler, maintenir) et recycler. Le LGI est composé de 90 personnes, dont 30 enseignants-chercheurs et 45 doctorants, couvrant les disciplines des sciences de la conception, du génie industriel, de l'automatique, des sciences informatiques, des sciences économiques et de gestion. Le LGI est organisé en 4 équipes de recherche, 5 thèmes transversaux et 10 chaires industrielles. Les 4 équipes sont **(IC) Ingénierie de la Conception**, (MO) Management des Opérations, (SR) Sureté et Risques, **(ED) Economie Durable**. Les 5 thèmes transverses industriels et sociétaux sont : systèmes de mobilité, systèmes énergétiques, systèmes de santé, industrie du futur et **économie circulaire**.

8.3 Annexe 3 : Fiches c-indicateurs

Catégories	Indicateurs	Acronymes	Outils associés
Fiche 1 : Performance globale (corporate reporting, à l'échelle de l'entreprise)	Circulytics	Circulytics	Web-based
	Circular Transition Indicators	CTI	Web-based
Fiche 2 : Evaluation de la circularité au niveau matière	Material Circularity Indicator	MCI	Excel
Fiche 3 : Evaluation de la circularité au niveau produit manufacturé	Product Circularity Indicator	PCI	Excel
Fiche 4 : Aide à la conception (circularité potentielle)	Concept Circularity Evaluation Tool	CCET	Excel
Fiche 5 : Réutilisation/Réemploi	Reuse Potential Indicator	RPI	Formules
Fiche 6 : Flux matière (type MFA)	End-of-Life Recycling Rate	EoL-RR	Formules
	Recycled Content Old Scrap Ratio	RC OSR	
Fiche 7 : Flux d'énergie	Circularity Index	CI	Formules
	Circularity of Material Quality	Qc	Formules
Fiche 8 : Circularité d'un territoire	Regional Material Flow tools for the Circular Economy	RMFCE	Formules Template Excel
Fiche 9 : Impacts environnementaux (hors ACV)	Recycle Benefit Rate	RBR	Formules
	Recycled Content Benefit Rate	RCBR	
Fiche 10 : Impacts socio-économiques	Socio-economic Indicator for EoL Strategies for Bio-based Products	SEI-EoL	Formules
	Total Circular Revenue	TCR	
	Total Cost of Ownership	TCO	

Source : Circulytics :



- 2020 / CTI :



- 2021

PRÉSENTATION

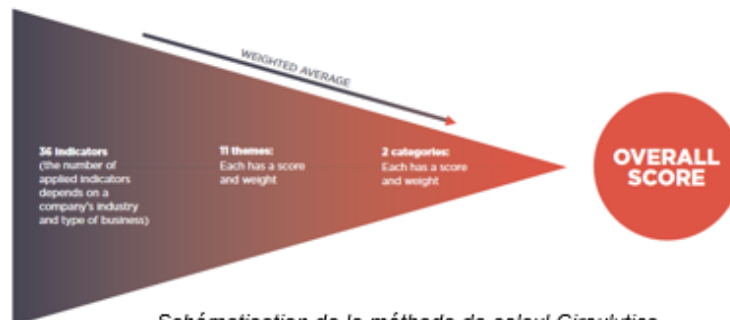
Les deux outils conviennent à tout type d'organisation (production de bien ou service) et de secteur :

- **Circulytics** : un outil en ligne qui vise à mesurer, via un jeu d'indicateurs, le degré de circularité d'une entreprise sur l'ensemble de ses activités. Onze thèmes sont étudiés. La circularité ainsi mesurée est classée en deux catégories : les potentiels (enablers), i.e. quels sont les leviers activés par l'entreprise pour l'économie circulaire, et les résultats (outcomes), i.e. la mesure des actions engagées sur les intrants, les matériaux, l'énergie, la réparabilité des produits, etc.). L'outil génère un score unique de circularité pour l'entreprise allant de la lettre A (meilleur score) à E (le moins bon).
- **Circular Transition Indicators (CTI)** : un outil en ligne, d'auto-évaluation de la performance de circularité d'une entreprise. Le CTI calcule dans quelle mesure une entreprise est capable de garantir des boucles de circularité de la matière dans la chaîne de valeur. Le CTI propose 3 modules : "boucler la boucle" (module obligatoire - pour calculer l'efficacité de l'entreprise à fermer la boucle de ses flux matières, eau et énergie), "optimiser la boucle" (module optionnel - pour donner un aperçu de l'efficacité des ressources), et "valoriser la boucle" (module optionnel - pour illustrer la valeur ajoutée commerciale des flux de matière circulaires).

EXPRESSION ET CALCUL

• **Circulytics** :

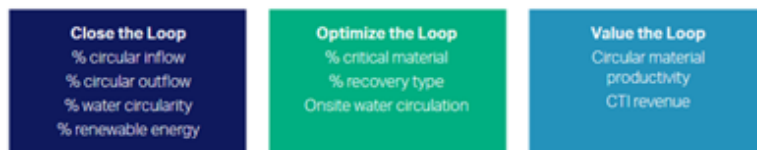
- Chaque indicateur est noté de 0-100 et est pondéré pour que le total par thème soit égal à 100.
- Chaque thème noté ainsi de 0 à 100 et est également pondéré pour que le total par catégorie soit égal à 50.



Schématisme de la méthode de calcul Circulytics

• **CTI** : propose un jeu de 9 indicateurs qui se calculent indépendamment les uns des autres :

- Le détail des méthodes de calcul pour chaque indicateur est détaillé dans la documentation.



Détail des indicateurs de chaque module du CTI

Crédits :



&



pour

SCORE LCA

- 2021

1/3

DONNÉES REQUISES

- **Circulytics** : l'outil se compose d'une suite de questionnaires.
 - **Informations générales** sur l'entreprise
 - **Enablers** : la place de l'économie circulaire dans la stratégie de l'entreprise, la communication sur le sujet en interne, service dédié, outils et process, engagement avec les parties prenantes externes
 - **Outcomes** (selon la catégorisation de votre organisation) : détail des flux de matière entrants et sortants (masse, part de renouvelable et recyclé, potentiel de recyclage,...), la part de revenu provenant de vos services circulaires, un détail des installations et équipements utilisés, la consommation d'eau, la consommation énergétique et une partie sur la finance.
- **CTI** :
 - **Boucler la boucle** : le détail des flux de matière/eau/énergie entrants et sortants (quantité, part de renouvelable et de recyclé, potentiel de récupération) ainsi qu'une connaissance plus globale des taux de récupération des matériaux propres au secteur et au territoire, normes réglementaires et disponibilité de l'eau.
 - **Optimiser la boucle** : détail des matériaux critiques/rares utilisés, volume et qualité d'eau requis dans le processus, type de récupération par flux sortant (recyclage, réutilisation, biodégradation, ...)
 - **Valoriser la boucle** : recettes générées par la partie évaluée de l'entreprise et par chaque groupe de produits, niveau de circularité par groupe de produits

FINALITÉ DE L'INDICATEUR (avec (Cir) = Circulytics et (C-C) = CTI + Circulytics)

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • (C-C) Effective (rétroactif) • (Cir) Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • (C-C) Information • (C-C) Prise de décision • (Cir) Communication • (Cir) Education 	<ul style="list-style-type: none"> • (C-C) Générique (entreprise) • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • (C-C) Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • (C-C) Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • (C-C) Maintenance & durabilité • (C-C) Réemploi / réutilisation • (C-C) Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • (Cir) Conception • (C-C) Production • (C-C) Utilisation • (C-C) Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • (C-C) Technosphère • Biosphère

TRANSPARENCE

- **Circulytics** : documentation et méthodologie disponibles en téléchargement gratuit : <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circulytics-measuring-circularity> et outil en ligne : <https://ellenmacarthurfoundation.wufoo.com/forms/circulytics-application/>
- **CTI** : documentation et méthodologie disponibles en téléchargement gratuit : <https://www.wbcso.org/Programs/Circular-Economy/Factor-10/Metrics-Measurement/Resources/Circular-Transition-Indicators-v2.0-Metrics-for-business-by-business> et outil en ligne : <https://ctitool.com/>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
CTI : Transparence	Absence d'indicateurs de dimension sociale
Outil en libre accès (en plusieurs langues pour Circulytics)	CTI : Outil en ligne payant après une utilisation
Outils adaptés à plusieurs secteurs et tailles d'entreprises	Circulytics : manque de transparence (sur le calcul du score)
FAQs disponible	

POPULARITÉ



MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

Circulytics est complémentaire aux approches au niveau du produit.

CAS D'APPLICATION



Circulytics : Scores des entreprises ayant complété la version 1.0 (le nombre d'entreprises ayant obtenu le score est indiqué sur le graphique)

LIEN AVEC L'ACV

Des données de sortie de l'ACV peuvent être utilisées pour le calcul des indicateurs (consommation énergétique, consommation d'eau).

Source :  &  &  - 2015

PRÉSENTATION

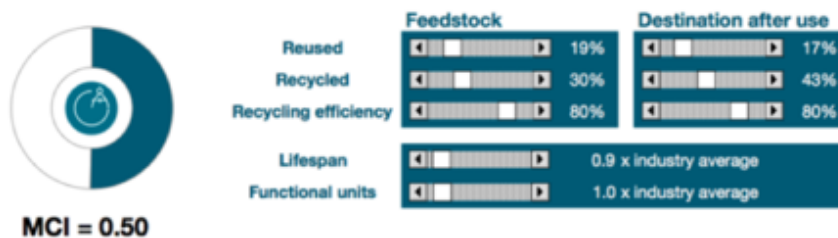
Le MCI combine les aspects de durée et d'intensité d'utilisation avec la proportion de contenu recyclé* et la répartition des matériaux recyclables dans un produit en un score unique, applicable au produit ou à l'échelle d'une entreprise. Il prend en compte les taux de recyclage et réutilisation, mesure comment les flux circulaires sont maximisés et les flux linéaires minimisés.

*contenu recyclé : matériau issu du procédé de recyclage (hors réutilisation, hors valorisation, recyclage matière uniquement)

Le MCI est une valeur entre 0 et 1, où 1 indique le plus haut niveau de circularité.

Le MCI a pour objectifs :

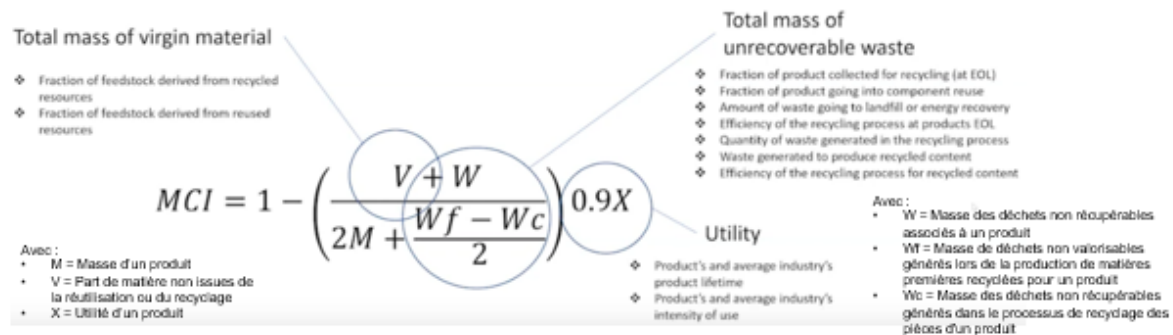
- De comparer différentes solutions de matériaux / produits
- De savoir de quelles ressources naturelles nous dépendons et dans quelle mesure



Aperçu de l'interface et du rendu

EXPRESSION ET CALCUL

Une description de chacun des éléments intervenant dans le calcul du MCI est disponible dans la documentation :



Expression générale (calcul automatique en fonction des paramètres renseignés dans l'interface)

PARAMÈTRES À RENSEIGNER

	Matière première	Destination après usage
% Réutilisé	Part de contenu réutilisé	Part de contenu réutilisable
% Recyclé	Part de contenu recyclé	Part de contenu recyclable
Efficacité du recyclage	Taux de perte lors du recyclage	Taux de perte du recyclage en fin de vie
Durée de vie	Durabilité comparée à la moyenne du marché	Compléter l'un ou l'autre de ces 2 paramètres
Unités fonctionnelles	Nombre de réutilisations comparée à la moyenne du marché	

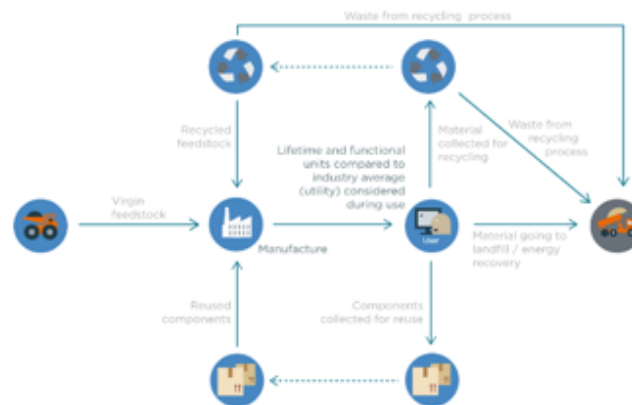
Crédits :  &  pour  - 2021

1/3

DONNÉES REQUISES

Une nomenclature détaillée est nécessaire, avec notamment les données suivantes :

- **Entrées du processus de production** : Quelle part de flux entrants proviennent de matériaux vierges, recyclés et réutilisés ?
- **Utilité pendant la phase d'utilisation** : Sur quelle durée et à quelle intensité le produit est-il utilisé en comparaison avec la moyenne des fabricants de produits similaires ?
- **Scénario de fin de vie** : Quelle part de matière va en décharge (ou récupération d'énergie), quelle part est collectée pour recyclage, quels composants sont collectés pour réutilisation ?
- **Efficacité du recyclage** : Dans quelle mesure le processus de recyclage est efficace pour produire de la matière première recyclée et pour recycler les matériaux après usage ?



Flux de matières pris en compte dans le calcul du MCI

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • Information • Prise de décision • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • Technosphère • Biosphère

TRANSPARENCE

Documentation et méthodologie disponibles en téléchargement gratuit :

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/material-circularity-indicator>

Le calcul se fait à l'aide d'un fichier Excel téléchargeable gratuitement :

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/material-circularity-indicator>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Méthodologie de calcul disponible	Inclut uniquement les flux de matériaux, pas leur toxicité, CO2/énergie, rareté ni eau.
La réparation et le reconditionnement peuvent être inclus en adaptant les paramètres de durée de vie et de réutilisation, mais pas de modélisation détaillée	L'indicateur de circularité seul n'est pas suffisant, il doit être resitué dans un contexte et être utilisé avec d'autres indicateurs en complément
Indicateur facile à interpréter	Le software n'est pas en open source

POPULARITÉ

Reconnu	Intermédiaire	Marginal
---------	---------------	----------

MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

Le MCI fait partie du set d'indicateurs Circulytics permettant de calculer en un score unique la performance circulaire d'une entreprise.

Le projet de recherche est en train de travailler sur la prise en compte dans le MCI des matériaux biosourcés, en adressant notamment les défis liés aux matériaux combinant biosourcé et technique, ainsi que des métriques permettant d'évaluer les risques complémentaires liés aux matériaux biosourcés.

CAS D'APPLICATION

- Exemple d'une tablette numérique

Paramètres renseignés		
	Baseline tablet	Redesigned tablet
Bill of materials	<ul style="list-style-type: none"> Plastic casing Front glass cover Electronic components 	<ul style="list-style-type: none"> Aluminium casing Front glass cover Electronic components
Mass	0.68 kg	0.74 kg
Feedstock materials	100% virgin materials 0% recycled materials 0% reused components	58.3% virgin materials 0% recycled materials 41.7% reused components
Destination after use	100% to landfill 0% to recycling 0% to reuse	58.3% to landfill 0% to recycling 41.7% to reuse

Comparaison des résultats

	Baseline tablet	Redesigned tablet
Material Circularity Indicator	0.10	0.46

LIEN AVEC L'ACV

Le logiciel GaBi propose un "circularity toolkit" intégrant le calcul du MCI :

<http://www.qabi-software.com/america/software/qabi-software/qabi-circularity-toolkit/>

http://www.qabi-software.com/uploads/media/GaBi-Circularity-Toolkit_flyer.pdf

Source : Bracquené, E., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2020). Measuring the performance of more circular complex product supply chains. Resources, Conservation and Recycling, 154, 104608

PRÉSENTATION

Le PCI est un indicateur agrégé traduisant la recirculation du produit. Il a été développé comme une version augmentée du MCI (fiche indicateur de circularité n°2). Il tient compte de l'étanchéité des cycles de matériaux et de la relation avec d'autres systèmes de produits tels que l'utilisation ou l'approvisionnement en matériaux recyclés. Les différentes étapes de fabrication sont prises en compte et les pertes de matériaux associées sont comptabilisées en tant que déchets ou matériaux recyclés. L'inclusion d'étapes de fabrication distinctes permet aux différents flux de restauration de réintégrer la chaîne de production à l'étape appropriée.

C'est un indicateur intéressant pour mesurer et comparer l'efficacité de différentes stratégies d'économie circulaire appliquées à un système.

Le PCI est une valeur entre 0 et 1, où 1 indique le plus haut niveau de circularité.

EXPRESSION ET CALCUL

Le PCI est calculé en considérant l'indicateur de flux linéaire (LFI) et l'utilité du produit (X) dans l'équation suivante :

$$PCI = 1 - \frac{LFI}{X}$$

Avec :

LFI : Linear Flow Index

X : Utility Factor

PARAMÈTRES À RENSEIGNER

Une description de chacun des éléments intervenant dans le calcul du PCI est disponible dans la documentation :

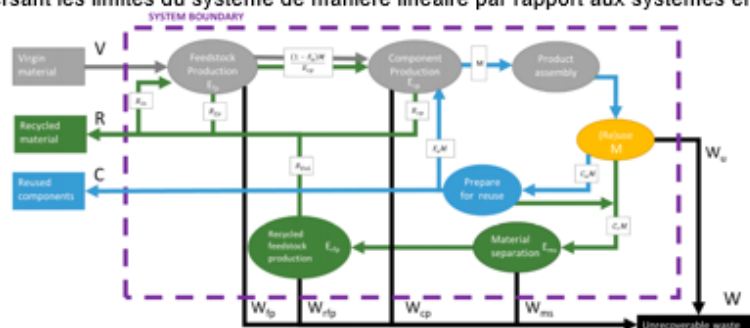
Parameter	Product Circularity Indicator
Virgin material	$V = \frac{(1-E_u)M}{E_{fp}E_{cp}}(1-E_r)$
Waste from feedstock production	$W_{fp} = \frac{(1-E_u)M}{E_{fp}E_{cp}}(1-E_{fp})(1-C_{fp})$
Waste from component production	$W_{cp} = \frac{(1-E_u)M}{E_{cp}}E_{fp}(1-E_{cp})(1-C_{cp})$
Uncollected EoL product	$W_u = M(1-C_r - C_u)$
Waste from material separation	$W_{ms} = M(1-E_{ms})C_r$
Waste from recycled feedstock production	$W_{rfp} = ME_{ms}C_R(1-E_{rfp})$
Unrecoverable waste	$W = W_{fp} + W_{cp} + W_u + W_{ms} + W_{rfp}$
Recycled material used for feedstock production	$R_{in} = E_r \frac{(1-E_u)M}{E_{fp}E_{cp}}$
Recycled material recovered	$R_{out} = (1-E_{fp})C_{fp} \frac{(1-E_u)M}{E_{fp}E_{cp}} + (1-E_{cp})C_{cp} \frac{M}{E_{cp}} + E_{rfp}E_{ms}C_rM$
Recycled material (net exchange)	$R = R_{in} - R_{out} $
Reused components (net exchange)	$C = M(F_u - C_u) $
Linear Flow Index	$LFI = \frac{V+W+ R + C }{V_{inacc}+W_{inacc}}$
Utility factor	$X = \left(\frac{L}{L_0}\right) \left(\frac{U}{U_0}\right) = \frac{U}{U_0}$

Vue d'ensemble des équations utilisées pour le calcul de PCI

DONNÉES REQUISES

Une nomenclature détaillée du système et des flux est nécessaire, avec notamment les données suivantes :

- **Quantité de matière vierge** : masse connue du produit final, perte matière pendant la production de matière première et composant, part de composants réutilisés.
- **Part de déchets non récupérables du système** : quantité de déchets produits aux étapes de fabrication et après usage, part de déchets réintroduit dans le système et part de déchets incinérés ou mis en décharge.
- **Matière recyclée** : quantité de matériaux recyclés utilisés comme intrants, déchets générés pendant la production des matières premières et la production des composants, quantité de matériaux recyclés récupérés à la fin de leur vie utile
- **Composants réutilisés** : les produits peuvent être collectés pour la récolte des pièces afin de permettre le réusinage ou la réparation.
- **Utilité pendant la phase d'utilisation** : la durée et l'intensité d'utilisation du produit en comparaison avec la moyenne des fabricants de produits similaire
- **Indicateur de flux linéaire** : part de matière et composant échangés avec d'autres systèmes ; il s'agit de la fraction de matériau traversant les limites du système de manière linéaire par rapport aux systèmes entièrement linéaires.



Flux de matières pris en compte dans le calcul du PCI

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • Information • Prise de décision • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du CdV impactées	Sphère de l'EC concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • Technosphère • Biosphère

TRANSPARENCE

Formules disponibles dans le document.

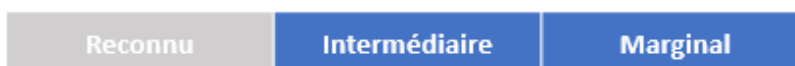
Article payant / Accès via base de données académique ; contacter les auteurs pour avoir accès à la documentation

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919305142>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Transparence	Inclut uniquement les flux de matériaux, pas leur toxicité, CO2/énergie, rareté ni eau.
Indicateur facile à interpréter	L'indicateur de circularité seul n'est pas suffisant, il doit être resitué dans un contexte et être utilisé avec d'autres indicateurs en complément
Indicateur plus précis que le MCI	Difficulté à collecter les données exactes

POPULARITÉ



MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

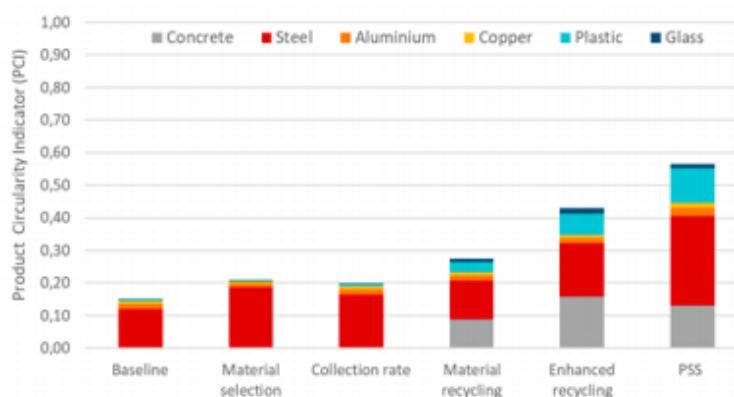
Le PCI a été développé en réponse aux limites du MCI : le MCI ne tient pas compte de l'étanchéité des cycles des matériaux et ignore la relation avec d'autres systèmes de produits, comme par exemple avec l'utilisation ou l'approvisionnement en matériaux recyclés. Une comparaison MCI/PCI est disponible dans la documentation.

Pour le PCI, les limites soulevées en vue de l'améliorer sont qu'actuellement, la différence de qualité des matériaux recyclés n'est pas prise en compte en raison de l'absence d'un facteur de qualité approprié qui mesure la dégradation de la qualité pour les différents types de matériaux. La traçabilité des matériaux et leur rareté ne sont pas non plus considérées dans le calcul.

CAS D'APPLICATION

- Exemple avec une étude de cas réel basée sur une machine à laver :

PSS : Product Service System



Résultats de PCI calculés pour chacun des scénarios d'amélioration centrés économie circulaire

LIEN AVEC L'ACV

Le logiciel GaBi propose un "circularity toolkit" intégrant le calcul du MCI. Il est donc possible d'utiliser le calcul du MCI et de le combiner à l'équation générale du PCI pour obtenir le score de l'indicateur.

<http://www.gabi-software.com/america/software/qabi-software/qabi-circularity-toolkit/>

http://www.gabi-software.com/uploads/media/GaBi-Circularity-Toolkit_flyer.pdf

Source : Kamp Albæk, J., Shahbazi, S., McAlloone, T. C., & Pigosso, D. C. (2020). Circularity evaluation of alternative concepts during early product design and development. *Sustainability*, 12(22), 9353.

PRÉSENTATION

Le CCET est un outil qui vise à soutenir l'évaluation de concepts alternatifs de produit en fonction de leur potentiel de circularité et ceci, dès les premières étapes de la conception et du développement du produit. Il a été développé de manière itérative sur la base d'une analyse documentaire approfondie des critères de réussite pour le développement d'outils, de lignes directrices et d'outils existants pour la conception et le développement de produits circulaires et d'une forte collaboration avec les entreprises de fabrication. L'outil a été testé et vérifié dans quatre entreprises de fabrication des pays nordiques. L'outil s'est avéré utile pour évaluer la circularité des produits et pour soutenir le processus de prise de décision dans les premières étapes de la conception et du développement du produit.

L'outil est donc à mettre en place dès les premières étapes de conception et développement d'un produit.

Le CCET est un outil Excel, il permet de comparer le potentiel de circularité de un à trois concepts différents sur la base de 26 critères répartis dans 13 stratégies de circularité.

Le résultat d'un concept est donné sous forme d'un pourcentage, indiquant ainsi sa performance par rapport au score de circularité le plus élevé possible pour ce type de produit.

Plus le score total de circularité est élevé, meilleur le concept sera en terme de circularité.



Aperçu de l'interface et du rendu

EXPRESSION ET CALCUL

Le score de circularité du concept est calculé d'après l'équation suivante :

$$\frac{\sum_{i=1}^n Pt \cdot Sg \cdot Cp}{\sum_{i=1}^n Pt}$$

Avec

Pt : Score du type de produit (étape 1)

Sg : Score des objectifs stratégiques (étape 2)

Cp : Performance du concept (étape 3)

LES PARAMÈTRES À RENSEIGNER

Pour chacune des stratégies de circularité :

- Un score du type de produit : c'est le niveau d'importance de la stratégie vis-à-vis du type de produit et des caractéristiques du marché (de 0 à 6, calculé automatiquement par l'outil en fonction des informations renseignées)
- Un score des objectifs stratégiques : c'est le niveau d'importance de la stratégie vis-à-vis de la stratégie de l'entreprise (de 0 à 3, indiqué par l'utilisateur)
- Une note de performance du concept correspondante pour chaque critère (de 0 à 3, indiqué par l'utilisateur)

DONNÉES REQUISES

L'outil se compose d'une suite de questionnaires avec une liste de choix de réponses possibles.

Pour l'étape 1 : connaissance du cycle de vie du produit et des caractéristiques du marché à renseigner via un questionnaire

- La durée de vie approximative du produit et les raisons de son passage au statut de déchet.
- Les intrants pour chaque étape du cycle de vie : matières premières, les ressources nécessaires et déchets produits lors de la fabrication, la composition de l'emballage et le type/distance de transport, les consommables et l'énergie consommée lors de l'utilisation
- Scénario de fin de vie : la recyclabilité et la réutilisabilité du produit
- Le marché : existence ou non d'un marché de l'occasion/location pour ce type de produit

Pour l'étape 2 : connaissance de la stratégie de l'entreprise et de ses objectifs en terme de circularité à renseigner via un questionnaire

Pour l'étape 3 : connaissance du cycle de vie envisagé pour chacun des concepts (idem étape 1) à renseigner dans un tableau

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Information</u> • <u>Prise de décision</u> • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Technosphère</u> • Biosphère

TRANSPARENCE

Documentation et méthodologie disponibles en téléchargement gratuit :

<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9353>

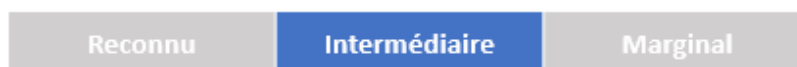
Le calcul se fait à l'aide d'un fichier Excel :

<http://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9353/s1>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Transparence	Expérimentation de l'outil uniquement auprès de petites et moyennes entreprises
Outil en libre accès	Réponses subjectives aux questionnaires et de l'évaluation des niveaux de performance des concepts
A utiliser dès les premières étapes de développement	Tendance à sous évaluer le potentiel de circularité par rapport au CPI et CEIP

POPULARITÉ

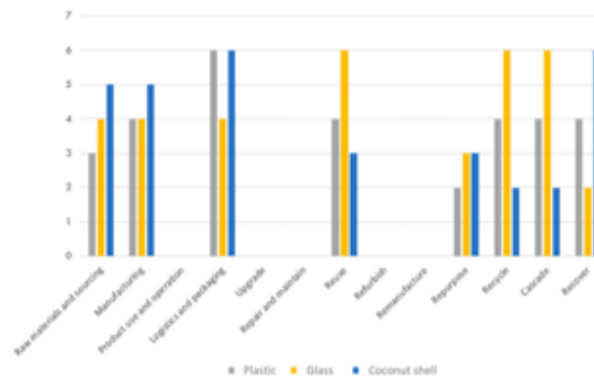


MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

Le développement et les tests futurs de l'outil pourraient se concentrer sur des entreprises plus grandes, avec des produits plus complexes, des processus de développement de produits plus robustes et des fonctions plus engagées. Bien que les tests aient donné des résultats prometteurs, l'outil peut encore être amélioré. Par exemple, en ce qui concerne le questionnaire, d'autres tests et adaptations pourraient être effectués si davantage de données sont disponibles et si le CCET est testé dans d'autres entreprises ayant des produits et des processus de développement de produits différents.

CAS D'APPLICATION

- Exemple avec trois bouteilles de boisson fabriquées à partir de différents matériaux : plastique, verre et fibres de coco



Comparaison des résultats

LIEN AVEC L'ACV

Approche en cycle de vie (matériaux, production, utilisation, fin de vie)

PRÉSENTATION

Le RPI indique dans quelle mesure un matériau est « semblable à une ressource » plutôt que « semblable à un déchet », selon les technologies actuellement disponibles. L'outil spécifie un continuum entre le caractère de ressource ou de déchet des matériaux. Il quantifie la réutilisabilité technique maximale d'un matériau en fonction des technologies économiquement disponibles pour réutiliser le matériau d'une manière écologiquement rationnelle.

A noter que le concept est intrinsèquement lié à un temps ainsi qu'à un périmètre géographique, puisque la réutilisabilité varie d'une région à l'autre en raison des différences de qualité des matériaux et du niveau de développement technologique.

L'indicateur de potentiel de réutilisation exprime l'utilité du matériau par une valeur réelle comprise entre 0 et 1. Il est égal à 0 lorsque tous les matériaux sont mis au rebut et à 1 lorsque tous les matériaux peuvent être réutilisés.

Si un matériau secondaire donné a une valeur de potentiel de réutilisation de 0,45 cela signifie que 45% de ce matériau peut être réutilisé grâce aux technologies actuelles. En d'autres termes, le matériau est considéré comme étant à 45 % "semblable à une ressource" ou à 55 % "semblable à un déchet".

EXPRESSION ET CALCUL

L'indicateur de potentiel de réutilisation est le ratio de deux données quantitatives pour un même matériau :

Indicateur de potentiel de
réutilisation = a/b

Avec

a : La portion massique économiquement réutilisable du matériau

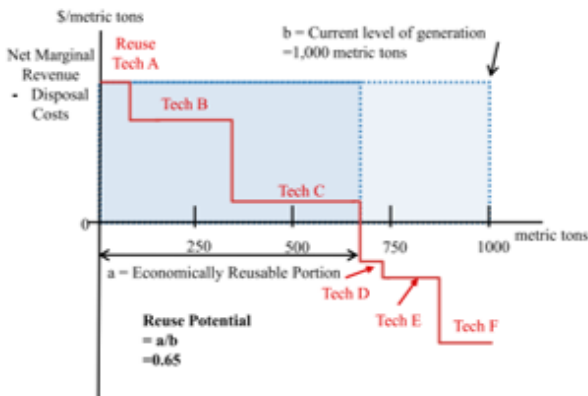
b : La masse totale de matériau produite

a et b sont à périmètre géographique et temporel équivalents

La portion économiquement réutilisable du matériau (*a*) ne considère pas la part de matériau issue de technologies ayant un stade de commercialisation insatisfaisant ; c'est-à-dire celles dont la soustraction [Revenu marginal net – coût d'élimination du matériau s'il n'était pas recyclé] est négatif. Les technologies générant des nuisances environnementales au-delà des limites tolérables du périmètre géographique considéré et/ou dont le produit recyclé ne répondrait pas aux exigences environnementales données doivent également être exclues du calcul pour (*a*).

DONNÉES REQUISES

- Les technologies en capacité de traduire le déchet en ressource
- Les nuisances environnementales générées par ces technologies
- La quantité de matériau recyclé par ces technologies
- Le revenu net marginal pour recycler le matériau via chacune des technologies
- Le coût d'élimination du matériau s'il n'était pas recyclé
- Les impacts environnementaux du produit recyclé
- Les normes environnementales en vigueur sur le périmètre géographique étudié



EXEMPLE EXPLICATIF :

- L'axe des abscisses représente la quantité de matériau qui peut être réutilisée grâce aux technologies disponibles
- L'axe des ordonnées représente le revenu marginal net obtenu en vendant les matériaux traités moins les coûts d'élimination à pleine capacité
- Il est supposé que le matériau est généré à hauteur de 1000 tonnes métriques par unité de temps
- Six technologies sont développées pour réutiliser ce matériau
- Les technologies D, E et F sont exclues du calcul

Grâce aux technologies A, B et C, environ 650 tonnes sur les 1000 tonnes métriques initiales de matériau sont économiquement récupérables, ce qui donne un potentiel de réutilisation de 0,65

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • Information • <u>Prise de décision</u> • <u>Communication</u> • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Technosphère</u> • <u>Biosphère</u>

TRANSPARENCE

Formule disponible dans le document.

Article payant / Accès via base de données académique ; contacter les auteurs pour avoir accès à la documentation

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24594758/>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Formule simple	Accès à la méthodologie de calcul restreint
Etat des lieux technologiques	Difficulté à collecter les données techniques
Aide à la décision	Ne reflète pas la situation réelle : certains éléments économiques déterminants non pris en compte dans le calcul (le potentiel de réutilisation est plus élevé que le taux réel de réutilisation)
	Repose sur une hypothèse environnementale à forte influence sur l'indicateur : visant à garantir que réutilisation est effectuée de manière à ne pas nuire à la sécurité/santé publique et environnementale

POPULARITÉ

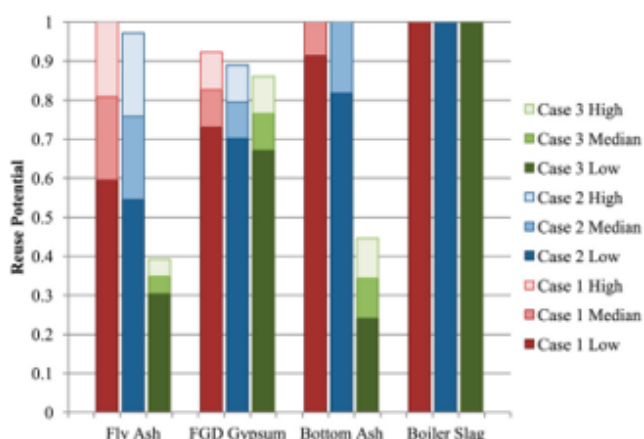


MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

Une application plus poussée de l'indicateur de potentiel de réutilisation à différents types de matériaux dans divers contextes permettrait d'établir des comparaisons et offrirait la possibilité d'affiner la méthode de calcul.

CAS D'APPLICATION

- Exemple avec des sous-produits de la combustion du charbon : le graphique détaille les valeurs du potentiel de réutilisation à trois niveaux différents (représentés par des couleurs foncées, moyennes et claires) et dans trois cas différents (représentés par des barres rouges, bleues et vertes) pour les cendres volantes, le gypse des fumées, les cendres résiduelles et les scories de chaudière produits en 2009 aux États-Unis :



LIEN AVEC L'ACV

Potentiel de réutilisation intéressant à considérer dans le scénario de fin de vie.

Source : Graedel, T. E.; Allwood, Julian; Birat, Jean-Pierre; Buchert, Matthias; Hagelüken, Christian; Reck, Barbara K.; Sibley, Scott F.; and Sonnemann, Guido, "What Do We Know About Metal Recycling Rates?" (2011). *USGS Staff – Published Research*. 596.

PRÉSENTATION

Les trois indicateurs décrits ci-après ont pour objectif de déterminer l'efficacité du recyclage d'un ou plusieurs matériau :

- **End-of-Life Recycling Rate (EoL-RR)** : exprime la performance du recyclage via la proportion de matières réellement recyclées. Si la collecte est faible, que les produits collectés sont fortement dégradés, que les matières récoltées n'entrent pas dans les limites inhérentes aux processus de recyclage et que les matières premières sont abondantes et bon marché, la valeur EoL-RR sera alors très faible.
- **Recycled Content (RC)** : donne la part de matières "secondaires" entrantes dans la production totale d'un produit. Si un matériau est l'objet d'une forte demande et que la durée d'utilisation des produits dans lesquels il est utilisé est longue, sa valeur RC sera faible.
- **Old Scrap Ratio (OSR)** : donne la proportion de matière recyclée dans le flux de déchets introduits dans le processus de recyclage. Si un matériau est précieux, il est utilisé avec un minimum de pertes dans les processus de fabrication et collecté avec un maximum d'efficacité, sa valeur OSR a alors toutes les chances d'être élevée.

EXPRESSION ET CALCUL

Les trois métriques sont des ratios :

Avec A = masse d'un matériau ou d'un ensemble de matériaux

• $EoL-RR =$

$$\frac{(A \text{ recyclée fonctionnelle})}{(A \text{ contenue dans les produits finis collectables en fin de vie})}$$

*Par « fonctionnelle », on entend « qui peut être réintroduit dans un processus de production de matières premières conduisant à la fabrication d'un matériau ou d'un alliage »

• $RC =$

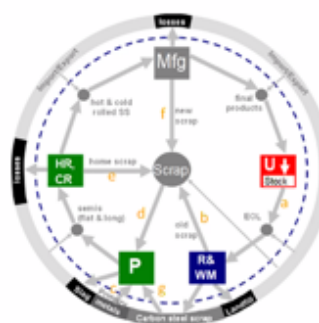
$$\frac{(A \text{ secondaire pré \& post-consommateur entrante dans la production d'un matériau ou d'un produit semi-fini})}{[(A \text{ primaire}) + (A \text{ secondaire pré \& post-consommateur}) \text{ utilisées dans la production de matériau ou produit semi-fini}]}$$

• $OSR =$

$$\frac{(A \text{ recyclée fonctionnelle})}{[(A \text{ recyclée}) + (A \text{ rebut de l'élaboration de produits manufacturés})]}$$

Calculating the main recycling indicators

- **End-of-Life Recycling Rate (EOL-RR)**
Share of functionally recycled old scrap (i.e. the recycled fraction of all EOL material, excluding non-functionally recycled or "downcycled" material) in the EOL material generated
- **Recycled Content (RC)**
Share of secondary inputs to total material inputs (i.e., primary plus secondary)
- **Old Scrap Ratio (OSR)**
Share of old scrap in the secondary raw material inputs (as opposed to new scrap, as such it informs the metric Recycled Content as to its scrap composition)



$$EoL-RR_{SS} = b/a$$

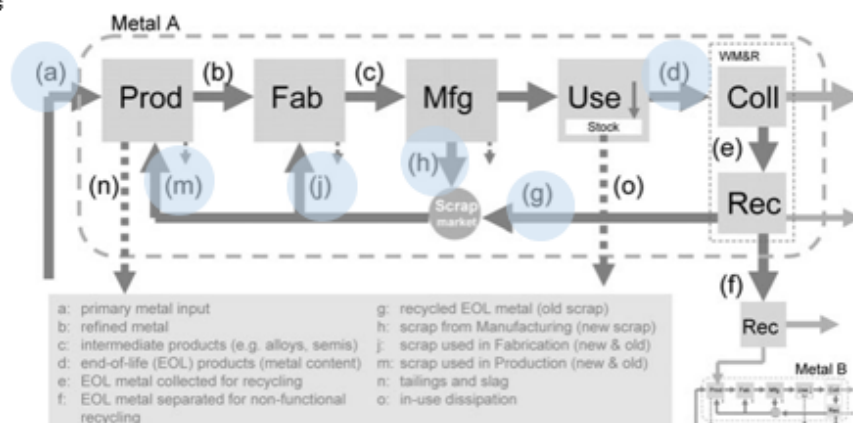
$$RC_{SS} = (d+g)/(c+d+g)$$

$$OSR_{SS} = b/(b+e+f) = b/d$$

DONNÉES REQUISES

Les flux de matière entrants et sortants liés à un cycle de vie d'un matériau (ou un groupe) :

- **EoL-RR** : données relatives au processus de recyclage d'un territoire donné et au taux de collecte de produits finis
- **RC** : quantité de matière vierge et de matière recyclée pré & post-consommateur introduite dans la production de matériau ou produit
- **OSR** : données relatives au processus de recyclage d'un territoire donné et au processus d'élaboration de produits manufacturés



Le cycle de vie simplifié des métaux et des flux associés

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • Information • Prise de décision • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Technosphère</u> • Biosphère

TRANSPARENCE

- Documentation et méthodologie disponibles en téléchargement gratuit : <https://digitalcommons.unl.edu/usqsstaffpub/596/>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Méthodologie de calcul disponible	Difficulté à collecter les données exactes
Indicateurs faciles à interpréter	
Source de données utile pour faire évoluer le secteur du recyclage	

POPULARITÉ

Reconnu

Intermédiaire

Marginal

MISE EN PERSPECTIVE DES INDICATEURS

Il serait intéressant d'élaborer un outil ou de compléter un outil existant pour y intégrer directement les données d'entrées et calculer les indicateurs (tel que Stan – logiciel MFA développé par TU Vienne).

CAS D'APPLICATION

- Exemple avec le calcul des taux moyens mondiaux de recyclage fonctionnel (EoL-RR) pour 60 métaux :

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	*	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	(117)	118
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	(Uus)	Uuo
* Lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
** Actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

□ <1% □ 1-10% □ >10-25% □ >25-50% □ >50%

LIEN AVEC L'ACV

Utilisation de flux de matières.

Source : CI : Cullen, J. M. (2017). Circular Economy: Theoretical Benchmark or Perpetual Motion Machine?. *Journal of Industrial Ecology*, 21: 483–486. doi:10.1111/jiec.12599 / Qc : Steinmann, Z. J. N., Huijbregts, M. A. J., & Reijnders, L. (2019). How to define the quality of materials in a circular economy?. *Resources, conservation and recycling*, 141, 362-363

PRÉSENTATION

- Le *Circularity Index* (CI) est une valeur de 0 à 1. Il est le résultat de la combinaison de deux ratios relatifs aux matériaux et à l'énergie. Un simple ratio (α) décrit les effets combinés de la dynamique des stocks et des pertes dissipatives. Tandis que le second ratio (β) peut être utilisé pour quantifier l'énergie nécessaire à la récupération des matériaux, par rapport à l'énergie nécessaire à la production de matière vierge.
- Le *Circularity of Material Quality* (Qc) est une valeur de 0 à 1. C'est un indicateur qui renseigne sur la qualité des matériaux recyclés basé sur la consommation d'énergie des produits recyclés par rapport à leurs homologues produits à partir de matières premières uniquement. Il tient compte de la qualité du matériau recyclé, de la fonctionnalité des substances présentes dans le matériau et du bilan massique. C'est un ratio avec en numérateur : les économies nettes d'énergie dues au recyclage de la matière (MJ/kg) et en dénominateur : le contenu énergétique de la matière (MJ/kg).

EXPRESSION ET CALCUL

Les deux indicateurs sont calculés selon les équations suivantes :

$$CI = \alpha\beta$$

Avec :

α = (matière valorisée en fin de vie / demande totale en matière)

β = 1 - (énergie nécessaire pour la valorisation de la matière / énergie nécessaire pour la production primaire)

$$Q_c = \frac{\alpha \cdot (E_{prod,s} - E_{r,s}) - E_{c,s} - \beta \cdot E_{d,s}}{E_p}$$

Avec :

α = quantité, en kg, de matériau secondaire que l'on peut obtenir en recyclant 1 kg de matériau primaire

β = le rapport entre le matériau de dilution et le matériau primaire à recycler

E_{prod} = énergie nécessaire en cycle de vie cradle-to-gate pour produire un matériau de même qualité que le matériau secondaire à partir d'intrants primaires

E_r = énergie directe nécessaire en cycle de vie cradle-to-gate pour la production du matériau secondaire à partir du matériau qui doit être recyclé

E_c = énergie requise pour le nettoyage des matériaux entrants par kg de matériaux primaires à recycler

E_d = énergie intrinsèque en cycle de vie cradle-to-gate des matières primaires requises pour la dilution, nécessaire pour obtenir des matières secondaires de qualité suffisante

E_p = énergie nécessaire en cycle de vie cradle-to-gate pour produire 1 kg de matière première

DONNÉES REQUISES

- **CI** : données relatives à la production et aux données de fin de vie (recyclage), dont la part de matière valorisée en fin de vie et la demande totale en matière ainsi que l'énergie nécessaire à la production de la matière primaire et à la valorisation.
- **Qc** : données relatives aux flux de matières et d'énergie, dont entre autres la quantité de matière secondaire que l'on peut obtenir en recyclant 1 kg de matériau primaire, l'énergie nécessaire pour la production du matériau secondaire à partir du matériau qui doit être recyclé et l'énergie consommée pour produire 1 kg de matière première.

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • (CI-Qc) Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • (CI-Qc) Information • (Qc) Prise de décision • (CI) Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • (CI-Qc) Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • (CI-Qc) Impacts (effets) • (CI) Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • (CI-Qc) Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • (CI-Qc) Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • (CI-Qc) Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • (CI-Qc) <u>Technosphère</u> • (CI-Qc) Biosphère

TRANSPARENCE

- **CI** : Article payant / Accès via base de données académique ; contacter les auteurs pour avoir accès à la documentation : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12599>
- **Qc** : Documentation et méthodologie disponibles en téléchargement gratuit : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918304130>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Transparence	CI : méthodologie non en libre accès
Indicateurs faciles à interpréter	
Indicateurs facilement quantifiables	

POPULARITÉ

Reconnu

Intermédiaire

Marginal

MISE EN PERSPECTIVE DES INDICATEURS

- Qc : à combiner avec d'autres indicateurs, tels que les aspects économiques et juridiques, pour que l'indicateur de qualité des matériaux proposé ici puisse aider à mieux quantifier la circularité de l'économie.

CAS D'APPLICATION

- CI : exemple avec l'acier, le béton, le plastique, le papier et l'aluminium :

	Steel	Concrete	Plastic	Paper	Aluminum
Recovered EOL material (Mt)	298	660	28	156	11
Total material demand (Mt)	1,500	32,800	299	408	54
α	0.2	0.02	0.09	0.38	0.21
Energy required to recover material (MJ/kg)	6.7	3.4	9.6	23.4	7.6
Energy required for primary production (MJ/kg)	21.7	3.4	38.4	26.2	174
β	0.69	0	0.75	0.11	0.96
Circularity Index, CI	0.14	0	0.07	0.04	0.20

- Qc : exemple avec le cas du recyclage de l'acier inoxydable :

Calcul du CI de cinq matériaux à haute intensité énergétique et paramètres utilisés

Parameters used for calculating the energy circularity of steel.

Steel	Energy	Details
α	1.51	Due to losses 1.105 kg scrap is required for 1 kg of usable scrap, the scrap input (by mass) is 60%, $\alpha = 1/(1.105 \cdot 0.6) = 1.51$
β	2/3	Dilution is done by mixing 40% pig iron with 60% scrap, so $\beta = 2/3$
$E_{p,ste}$	24.4 MJ	1 kg Steel low-alloyed, steel production, converter
$E_{r,s}$	9.1 MJ	Energy for recycling including scrap sorting and pressing 1 kg Steel, low-alloyed, RER, steel production, electric arc
$E_{c,s}$	0	No cleaning inputs (sorting and pressing are included under $E_{r,s}$)
$E_{d,s}$	16	1 kg Pig Iron, GLO, market for pig iron
E_p	62.8 MJ	1 kg Chromium steel 18/8, steel production, converter
Qc (Eq. (1))	0.198	$\alpha \cdot (E_{p,ste} - E_{r,s}) - E_{c,s} - \beta \cdot E_{d,s}$ E_p

Calcul de la circularité de l'énergie (Qc) de l'acier et paramètres utilisés

LIEN AVEC L'ACV

Indicateurs de flux ratio énergie complémentaires avec l'approche ACV.

Source : Virtanen, M., Manskinen, K., Uusitalo, V., Syväne, J., & Cura, K. (2019).

Regional material flow tools to promote circular economy. Journal of Cleaner Production, 235, 1020-1025.

PRÉSENTATION

L'économie circulaire au sein d'un territoire est mesurée au travers de la circularité des flux de différents matériaux-déchets, en tenant compte de différents facteurs : la matière entrante sur le territoire, la production propre à la région, l'élimination sous forme de stockage ou de mise en décharge, ainsi que la circulation des matières par le biais de la réutilisation, du recyclage ou de la valorisation énergétique dedans et en dehors du périmètre géographique concerné.

Le RMFCE est un jeu de trois indicateurs qui permettent d'évaluer l'économie circulaire au niveau d'une région pour un déchet donné. Ils se basent sur des ratios massiques entrée-sortie (R) de ce matériau :

- R_{ce} : décrit la quantité de matière qui circule pour être réutilisée/recyclée ou valorisée énergétiquement par rapport à la quantité de matière importée et produite sur le territoire, en précisant dans quelle mesure ce flux de matière est réutilisé/recyclé ou récupéré en énergie.
- $R_{c,eff}$: indique la quantité de matière réutilisée/recyclée par rapport à la quantité valorisée totale (recyclage + valorisation énergétique). Plus la valeur de l'indicateur est élevée, plus l'utilisation du matériau est efficace en termes de hiérarchie des déchets européenne pour ce matériau (i.e. plus il est réutilisé/recyclé).
- R_{region} : spécifie la part de valorisation sur le territoire étudié par rapport à la valorisation totale.

EXPRESSION ET CALCUL

$$R_{ce} = \frac{\sum_{n=1}^n m_{c,n} + \sum_{n=1}^n m_{out,c,n} + \sum_{n=1}^n m_{e,n} + \sum_{n=1}^n m_{out,e,n}}{\sum_{n=1}^n m_{in,n} + \sum_{n=1}^n m_{p,n}}$$

$$R_{c,eff} = \frac{\sum_{n=1}^n m_{c,n} + \sum_{n=1}^n m_{out,c,n}}{\sum_{n=1}^n m_{c,n} + \sum_{n=1}^n m_{out,c,n} + \sum_{n=1}^n m_{e,n} + \sum_{n=1}^n m_{out,e,n}}$$

$$R_{region} = \frac{\sum_{n=1}^n m_{c,n} + \sum_{n=1}^n m_{e,n}}{\sum_{n=1}^n m_{c,n} + \sum_{n=1}^n m_{out,c,n} + \sum_{n=1}^n m_{e,n} + \sum_{n=1}^n m_{out,e,n}}$$

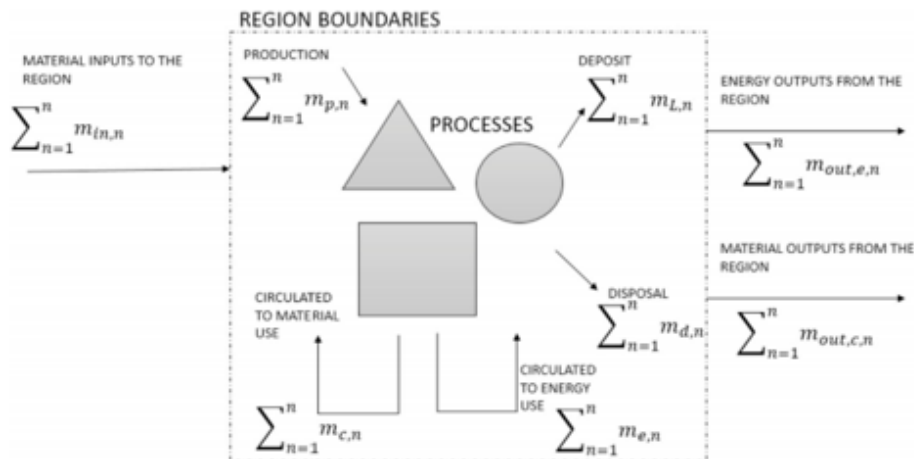
LES PARAMÈTRES À RENSEIGNER

R_{ce}	$R_{c,eff}$	R_{region}
(m_c) Quantité de matière réutilisée/recyclée sur le territoire	(m_c) Quantité de matière réutilisée/recyclée sur le territoire	(m_c) Quantité de matière réutilisée/recyclée sur le territoire
($m_{out,c}$) Quantité de matière réutilisée/recyclée hors du territoire	($m_{out,c}$) Quantité de matière réutilisée/recyclée hors du territoire	($m_{out,c}$) Quantité de matière réutilisée/recyclée hors du territoire
(m_e) Quantité de matière valorisée énergétiquement sur le territoire	(m_e) Quantité de matière valorisée énergétiquement sur le territoire	(m_e) Quantité de matière valorisée énergétiquement sur le territoire
($m_{out,e}$) Quantité de matière valorisée énergétiquement hors du territoire	($m_{out,e}$) Quantité de matière valorisée énergétiquement hors du territoire	($m_{out,e}$) Quantité de matière valorisée énergétiquement hors du territoire
(m_{in}) Quantité de matière entrante sur le territoire		
(m_p) Quantité de matière produite sur le territoire		

DONNÉES REQUISES

Les flux de chaque matériau (en quantité de matière) :

- Matière entrante dans la région
- Production de matière dans la région
- Élimination sous forme de stockage ou de mise en décharge dans la région
- Valorisation matière (réutilisation/recyclage) ou énergétique dedans et en dehors du périmètre géographique concerné



Flux de matières pris en compte dans le calcul du RMFCE (hormis les flux deposit & disposal)

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Information</u> • Prise de décision • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • Technosphère • Biosphère

TRANSPARENCE

Formules disponibles dans le document.

Article payant / Accès via base de données académique ; contacter les auteurs pour avoir accès à la documentation

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619323030>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Méthodologie de calcul disponible	Difficulté à collecter les données exactes d'une région
Indicateurs faciles à interpréter	Evaluation de la circularité d'un déchet et non de l'ensemble de la chaîne de valeur d'un matériau
Source de données utiles dans la perspective d'un développement territorial	

POPULARITÉ

Reconnu	Intermédiaire	Marginal
---------	---------------	----------

MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

La recherche mise en œuvre pour développer ces indicateurs confirme la complexité des écosystèmes de l'économie circulaire et les défis que représente la fermeture des boucles.

Alors que l'idée de l'économie circulaire gagne en importance aux niveaux régional, national et international, les quelques outils de mesure de la circularité existants se concentrent principalement au niveau du produit. L'objectif de la présente recherche était de créer et de tester des indicateurs au niveau régional, mais cela s'est avéré difficile en raison d'un manque de données fiables.

Les limites observées mettent en évidence un besoin de mieux quantifier les flux au niveau régional afin de faire progresser les objectifs et le suivi de l'économie circulaire.

CAS D'APPLICATION

- Exemple de l'évaluation de la circularité à Päijät-Häme en Finlande, au travers de 5 matières : le phosphore, les plastiques, les textiles, les déchets bois et les cendres:

Resource category	Material circulation to material or energy use (R_{me})	Material circulation to material use ($R_{m, ut}$)	Material circulation in the region (R_{region})
Phosphorous	0.66	1.00	1.00
Plastics	0.91	0.13	0.52
Textiles	1.17	0.09	0.50
Waste wood	1.01	0.19	0.95
Ash	0.31	1.00	1.00

Résultats calculés pour les 3 indicateurs pour Päijät-Häme

Bien que les objectifs nationaux et régionaux finlandais en matière d'écoconception mettent l'accent sur la réutilisation des matériaux plutôt que sur la récupération d'énergie, les présentes conclusions suggèrent que la récupération d'énergie est privilégiée dans la pratique.

LIEN AVEC L'ACV

Quantification de flux entrants et sortants d'un système

Différence avec l'ACV : focus territoire plutôt que produit/entreprise

Source : RBR // Huysman, S., Debaveye, S., Schaubroeck, T., Meester, S.D., Ardente, F., Mathieux, F., Dewulf, J., 2015a. The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. *Resources, Conservation and Recycling* 101, 53-60 // RCBR // Ardente, F., Mathieux, F., 2014b. Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an Energy using Product. *Journal of Cleaner Production* 83, 126-141.

PRÉSENTATION

Le *Recycle Benefit Rate* (RBR) et le *Recycled Content Benefit Rate* (RCBR) : tous deux indiquent les bénéfices environnementaux potentiels du recyclage comparé au non-recyclage (incinération ou enfouissement), selon une approche cycle de vie.

- Le *RBR* est défini comme le rapport entre les économies environnementales potentielles pouvant être réalisées grâce au recyclage et les charges environnementales liées à un cycle de vie linéaire du produit (production de la matière vierge et élimination du produit).
- Le *RCBR* se concentre sur le point de vue du concepteur du nouveau produit. Il peut être utilisé pour évaluer les avantages environnementaux de l'introduction de matériaux recyclés dans la fabrication d'un nouveau produit, par rapport à la production du produit entièrement à partir de matériaux vierges.

Les bénéfices et charges environnementales sont calculées en tant qu'impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie (ACV). Elles s'expriment en terme de consommation de ressources via l'application de la méthode CEENE (Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment). Cette méthodologie est basée sur le concept d'exergie (grandeur visant à mesurer la qualité d'une énergie), permettant de comptabiliser à la fois la quantité et la qualité d'un large éventail de ressources naturelles.

Une évolution de ces deux indicateurs a été proposée en 2019 pour répondre aux limites énoncées dans le chapitre *MISE EN PERSPECTIVE* de cette fiche. Source : Huysveld, S., Hubo, S., Ragaert, K., & Dewulf, J. (2019). *Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions*. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1-13.

EXPRESSION ET CALCUL

- RBR* : deux formules sont disponibles dans la documentation. L'une s'applique en cas de recyclage en boucle ouverte (cascade), tandis que l'autre (équation (1)) est applicable en cas de recyclage en boucle fermée ; le produit $\alpha 0$ est recyclé en produit $\alpha 1$.

$$RBR_{OL,1,2015} = \frac{RCR \left(\frac{m_{r,\alpha 1}}{m_{v,\alpha 1}} V_{\alpha 1}^* - R_{\alpha 0 \rightarrow \alpha 1}^* + D_{\alpha 0}^* \right)}{V_{\alpha 0}^* + D_{\alpha 0}^*} \times 100 \quad (1)$$

*RBR*_{OL,1,2015}: Recyclability Benefit Rate for 1 cascade [%], version of Huysman et al. (2015a)
RCR: recycling rate [%], defined as the ratio of the amount of recycled material produced over the amount of input waste material.
*m*_{v,α1}: mass of virgin material used to produce product α₁ [kg]
*m*_{r,α1}: mass of recycled material used to produce the product α₁ [kg]
*V*_{α1}^{*}: impact of production of virgin material for the product α₁ [impact unit/kg virgin material]
*R*_{α0→α1}^{*}: impact of recycling the product α₀ into the recycled material for product α₁ [impact unit/kg recycled material]
*V*_{α0}^{*}, *D*_{α0}^{*}: impacts due to production of virgin material and disposal of the product α₀ made from virgin material [impact unit/kg of product α₀]

- L'expression générale du *RCBR* est la suivante (équation («3»)) :

$$RCBR_{1,2014} = \frac{m_{r,\alpha 1} (V_{\alpha 1}^* - R_{\alpha 0 \rightarrow \alpha 1}^*)}{V_{\alpha 1}^* + M_{\alpha 1,p} + U_{\alpha 1,p} + D_{\alpha 1,p}} \times 100 \quad (3)$$

With symbols previously not introduced:

*RCBR*_{1,2014}: Recycled Content Benefit Rate for 1 cascade [%], version of Ardente and Mathieux (2014b)
*V*_{α1}^{*}, *M*_{α1,p}, *U*_{α1,p}, *D*_{α1,p}: impacts due to production of virgin material, manufacturing, use and disposal of the product α₁ made from virgin material [impact unit/product]

DONNÉES REQUISES

Un inventaire en cycle de vie du produit, dont notamment les données suivantes :

- La masse de chaque matériau
- Le taux de recyclage
- En cas de récupération énergétique en fin de vie : la quantité d'électricité et/ou de chaleur produites évitées par l'incinération des déchets

En vue de réaliser une analyse en cycle de vie pour obtenir les bénéfices et charges environnementales en terme de consommation de ressources via la méthode CEENE.

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • Information • Prise de décision • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • Générique • Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • Réemploi / réutilisation • Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • Utilisation • Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Technosphère</u> • Biosphère

TRANSPARENCE

- *RBR* : Documentation et méthodologie disponibles en téléchargement gratuit : <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewiY6a27kdbwAhX14uAKHa4uBRcQFjAAeqQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fcyberleninka.org%2Farticle%2Fn%2F1303098.pdf&uq=AQvVaw05iyLj2MPXFsbW14biE6m1>
- *RCBR* : Article payant / Accès via base de données académique ; contacter les auteurs pour avoir accès à la documentation https://www.researchgate.net/publication/266397751_Identification_and_assessment_of_product%27s_measures_to_improve_resource_efficiency_The_case-study_of_an_Energy_using_Product

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Transparence	RBR : la comparaison n'est pas équitable ; le dénominateur et le numérateur ne considèrent pas le même lot de produits
Indicateurs faciles à interpréter	Confusion dans la compréhension des résultats lorsque le dénominateur devient négatif
	Manque la prise en compte de la durée de vie des produits

POPULARITÉ

Reconnu

Intermédiaire

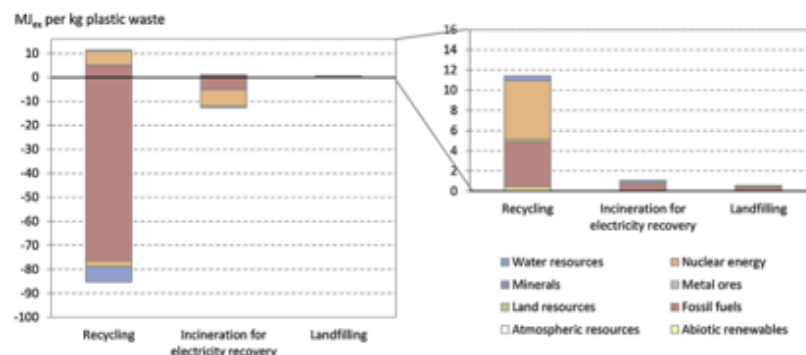
Marginal

MISE EN PERSPECTIVE DES INDICATEURS

- RBR : plusieurs défis restent à relever pour les recherches futures. Par exemple, le nouvel indicateur RBR en boucle ouverte ne tient pas encore compte de l'étape finale de l'utilisation en cascade, c'est-à-dire de l'incinération ou de la mise en décharge. En outre, la durée de vie n'a pas été prise en compte, c'est-à-dire la durée de vie des matériaux recyclés par rapport aux matériaux vierges. Aussi, une analyse coûts-avantages pourrait compléter cette analyse environnementale pour l'élaboration de politiques.
- Une évolution de ces deux indicateurs a été proposée en 2019. Source : Huysveld, S., Hubo, S., Ragaert, K., & Dewulf, J. (2019). *Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions*. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1-13

CAS D'APPLICATION

- RBR : un exemple avec le traitement de déchets plastiques extraits d'un aspirateur. L'application est en situation de recyclage en boucle fermée. Les résultats ont démontré qu'en termes de consommation de ressources (CEENE), les bénéfices environnementaux du recyclage de tous les plastiques de l'aspirateur sont de 60 % par rapport à une production vierge suivie d'une mise en décharge, et de 56 % si elle était suivie d'une incinération avec récupération d'électricité en fin de vie.



Résultats en MJ/kg des charges et bénéfices environnementaux liées au traitement de 1 kg de déchets plastiques

LIEN AVEC L'ACV

Les données de sortie de l'ACV sont utilisées comme données d'entrée pour le calcul de ces indicateurs de circularité.

Source : SEI-EoL // D'Adamo, I., Falcone, P. M., Imbert, E., & Morone, P. (2020). A Socio-economic Indicator for EoL Strategies for Bio-based Products. *Ecological Economics*, 178, 106794..

PRÉSENTATION

- Le *Socio-economic Indicator for EoL Strategies for Bio-based Products* (SEI-EoL) vise à identifier le meilleur procédé de fin de vie à appliquer à un produit biosourcé en tenant compte de l'impact socio-économique. Il est développé à partir d'un modèle intégré de processus de hiérarchie analytique et d'analyse décisionnelle multicritères (AHP-MCDA) basé sur la participation d'experts, et est capable de mesurer et de comparer la performance socio-économique des alternatives fin de vie pour les produits biosourcés. Le SEI-EoL fournit une valeur finale pour chaque option de fin de vie selon une base de 25 critères relatifs aux travailleurs, aux consommateurs, à la société en général, à la communauté locale et aux acteurs de la chaîne de valeur.
- Le *Total Cost of Ownership* (TCO) : permet d'exprimer les coûts complets de l'investissement et de son exploitation, en tenant compte non seulement du prix d'achat mais aussi des dépenses liées à la possession du bien évalué. Il intègre dans son calcul l'ensemble des coûts directs et indirects générés par la possession et l'utilisation du système : coût matériel, logiciel, consommations, locaux, personnel, formation, support, maintenance, sécurité... L'évaluation du coût total de possession permet d'avoir une vue d'ensemble de ce qu'est le produit et de sa valeur dans le temps. Cet indicateur peut, par exemple, aider une entreprise à déterminer quand elle doit remplacer les véhicules de son parc ou envisager la transition vers des véhicules loués.
- Le *Total Circular Revenue* (TCR) : permet d'exprimer les revenus provenant des activités en économie circulaire.

EXPRESSION ET CALCUL

- SEI-EoL :

$$SEI - EoL_{E,I} = RV_{E,C,I} * CV_{C,I}$$

$$SEI - EoL_E = \sum_{I=1}^{N_I} SEI - EoL_{E,I}$$

Avec :

RV = Row vector

CV = Column vector


E = EoL strategy


C = Criteria


I = Interviewee


N_I = Number of interviewees
- TCO :


$$TCO = I + O + M + D + P - R$$



I
Initial Cost


O
Cost of Operation


M
Cost of Maintenance


D
Cost of Downtime


P
Cost of Production


R
Remaining Value
- TCR :

$$TCR = \sum \text{revenus provenant des produits/services liés à l'économie circulaire}$$

PARAMÈTRES À RENSEIGNER

SEI-EoL :

Paramètre	Description
N _I	Nombre d'experts ayant participé au sondage
RV (vecteur ligne)	Définition de la valeur de chaque critère (pertinence) pour chaque option de fin de vie*. Les experts ont attribué une valeur à chaque critère sur la base de leurs connaissances et de leur expérience. Les valeurs variaient de 1 (pire) à 10 (le meilleur).
CV (vecteur colonne)	Définition d'une pondération pour chaque critère (priorité globale)
	*Les auteurs ont identifié 7 options de fin de vie

DONNÉES REQUISES

- *SEI-EoL* : la valeur donnée par chaque expert pour chacun des critères évalués ainsi que la pondération.
- *TCO* : toutes les entrées de coûts, non seulement celles qui affectent immédiatement le projet, mais aussi celles qui entrent dans les coûts plus tardivement sont nécessaires pour réaliser un calcul pertinent : c'est-à-dire l'ensemble des coûts directs et indirects générés par la possession et l'utilisation du système tels le coût des matériels, le coût des logiciels, les consommations, les locaux, le personnel affecté, la formation des utilisateurs, le support, la maintenance et la sécurité.
- *TCR* : la totalité des revenus provenant des activités en économie circulaire.

FINALITÉ DE L'INDICATEUR

Perspective de circularité	Usage (destination)	Transversalité de l'application	Performance évaluée
<ul style="list-style-type: none"> • (SEI-TCO) Effective (rétroactif) • Potentielle (proactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • (SEI-TCO) Information • (SEI-TCO) <u>Prise de décision</u> • Communication • Education 	<ul style="list-style-type: none"> • (TCO) Générique • (SEI) Spécifique secteur 	<ul style="list-style-type: none"> • (SEI-TCO) Impacts (effets) • Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre	Taille de la boucle	Étapes du cycle de vie impactées	Sphère de l'économie circulaire concernée
<ul style="list-style-type: none"> • (SEI-TCO) Matière / Produit • Organisation / activité • Territoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance & durabilité • (SEI-TCO) Réemploi / réutilisation • (SEI) Recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception • Production • (SEI-TCO) Utilisation • (SEI-TCO) Fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> • (TCO) Technosphère • (SEI-TCO) Biosphère

TRANSPARENCE

- *SEI-EoL* : Article payant / Accès via base de données académique ; contacter les auteurs pour avoir accès à la documentation : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800919321421>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
TCR/TCO: facile d'utilisation, parle aux entreprises	TCO : ne tient pas compte de la valeur de l'argent et évalue l'investissement uniquement en termes de coûts, et non de revenus
	SEI-EoL : absence d'outil
	SEI-EoL : difficulté pour construire un panel d'experts et pour collecter les données

POPULARITÉ

TCR / TCO

SEI-EoL

Reconnu

Intermédiaire

Marginal

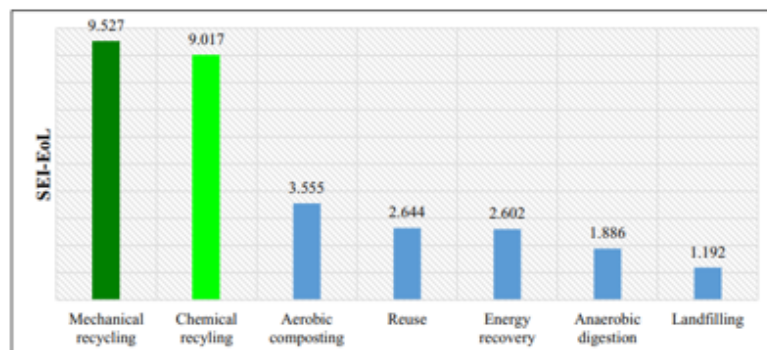
MISE EN PERSPECTIVE DES INDICATEURS

SEI-EoL :

- Il serait pertinent d'intégrer des critères environnementaux directement dans le calcul de cet indicateur afin de garantir l'intérêt environnemental d'une solution de fin de vie par rapport à une autre pour un produit donné.
- En outre, les valeurs des critères pourraient être quantifiées à l'aide d'observations expérimentales. En fait, il convient de mentionner que, bien que l'utilisation de MCDA-AHP apporte une rigueur scientifique, l'application au contexte réel ne peut être améliorée qu'au fur et à mesure que de nouvelles données sont disponibles. Plus précisément, avec de nouvelles données, les valeurs et les poids ne peuvent plus être attribués uniquement de manière subjective par des experts, mais de manière objective comme ils seront calculés dans des applications industrielles ou dans les laboratoires des centres de recherche.

CAS D'APPLICATION

- Le SEI-EoL est appliqué au cas spécifique du film à base d'acide polylactique (PLA) pour l'emballage alimentaire :



Classement des stratégies de fin de vie d'un film à base de PLA

LIEN AVEC L'ACV

- Approches complémentaires: social-ACV et ACC

8.4 Annexe 4 : Indice de réparabilité



En France, depuis le 1er janvier 2021, fabricants et distributeurs vont devoir fournir aux consommateurs une information capitale pour de nombreux accessoires : l'indice de réparabilité.

L'objectif de cet indice est de sensibiliser le consommateur à la réparation du produit dès son achat en l'informant de la réparabilité de son appareil.

L'indice de réparabilité est une note obligatoire à faire apparaître sur les produits au moment de leur achat. Cette mesure a été mise en place le 1er janvier 2021 dans le cadre de la loi anti-gaspillage promulguée le 10 février 2020, et porte sur plusieurs typologies d'appareils.

5 catégories de matériels servent actuellement pilotes : lave-linges, téléviseurs, smartphones, ordinateurs portables et tondeuses à gazon, avant que d'autres ne rejoignent cette liste plus tard.

Une note est attribuée par le fabricant de l'appareil sur chacun des critères en fonction de grilles de notation définies par le Ministère de la transition écologique. La note finale de l'indice de réparabilité est une moyenne des critères représentée par une note sur 10 au consommateur.

Cet indice de réparabilité porte sur 5 critères principaux :

1. Disponibilité de la documentation
2. Démontabilité, accès et outils
3. Disponibilité des pièces détachées
4. Prix des pièces détachées
5. Critère spécifique à la catégorie d'équipements concernée

Pour information, La mise au point de cet indice a été effectuée en concertation entre : fabricants, vendeurs, distributeurs et ONG, ainsi que des associations de consommateurs et l'ADEME.

Sources:

- <https://www.indicereparabilite.fr/grilles-de-calcul/>
- <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/indice-de-reparabilite-pour-les-produits-a2178.html>