

Alliance CircularIT

Pôle A « Recherche Amont et Formation »

Développer des solutions numériques pour des écosystèmes industriels et territoriaux circulaires

Livret de 10 fiches pratiques d'indicateurs de circularité

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/Allongement	Reuse Potential Indicator	RPI	Formules
	Circularity Longevity Indicators	CLI	
Fiche 6 : Flux matière (type MFA)	End-of-Life Recycling Rate	EoL-RR	Formules
	Recycled Content	RC	
	Old Scrap Ratio	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 Strategies	SEI-EoL	Formules
	Total Circular Revenue	TCR	
	Total Cost of Ownership	TCO	

Source : Circulytics :  - 2020 / CTI :  &  - 2021

PRÉSENTATION

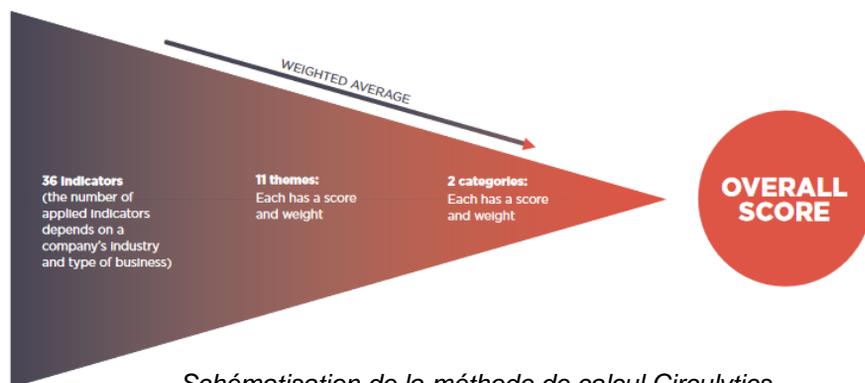
Les deux outils conviennent à tout type d'organisation (production de bien ou service) et de secteur :

- **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.



• **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

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

- (C-C) Effective (rétroactif)
- (Cir) Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- (C-C) Information
- (C-C) Prise de décision
- (Cir) Communication
- (Cir) Education

Transversalité de l'application

- (C-C) Générique (entreprise)
- Spécifique secteur

Performance évaluée

- Impacts (effets)
- (C-C) Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- Matière / Produit
- (C-C) Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- (C-C) Maintenance & durabilité
- (C-C) Réemploi / réutilisation
- (C-C) Recyclage

Étapes du cycle de vie impactées

- (Cir) Conception
- (C-C) Production
- (C-C) Utilisation
- (C-C) Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

- (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.wbcsd.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 <i>Circulytics</i>)	CTI : Outil en ligne payant après une utilisation
Outils adaptés à plusieurs secteurs et tailles d'entreprises	<i>Circulytics</i> : manque de transparence (sur le calcul du score)
FAQs disponible	

POPULARITÉ

Reconnu

Intermédiaire

Marginal

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)

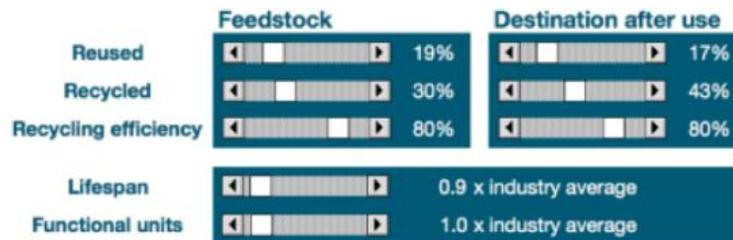
Le MCI est une valeur entre 0 et 1, où 1 indique le plus haut niveau de circularité.

Le MCI a pour objectifs :

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



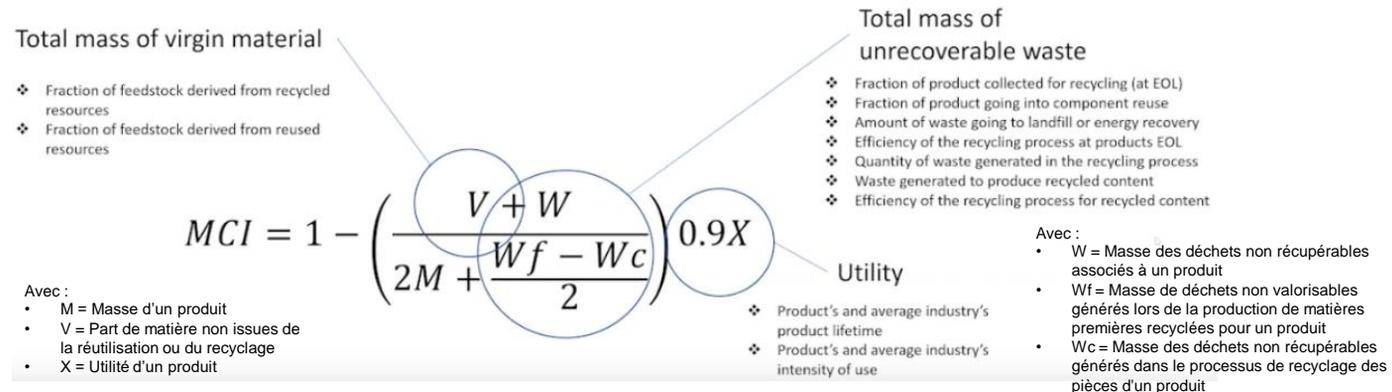
MCI = 0.50



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)

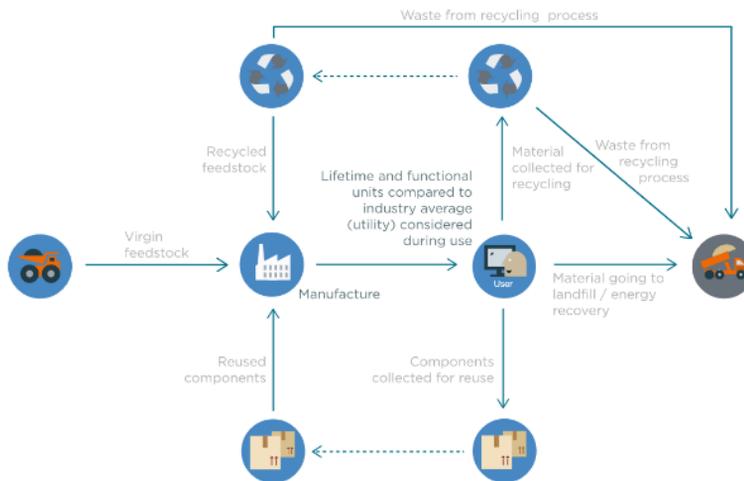
PARAMÈTRES À RENSEIGNER

	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	

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

- Effective (rétroactif)
- Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- Information
- Prise de décision
- Communication
- Education

Transversalité de l'application

- Générique
- Spécifique secteur

Performance évaluée

- Impacts (effets)
- Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- Matière / Produit
- Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- Maintenance & durabilité
- Réemploi / réutilisation
- Recyclage

Étapes du cycle de vie impactées

- Conception
- Production
- Utilisation
- Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

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

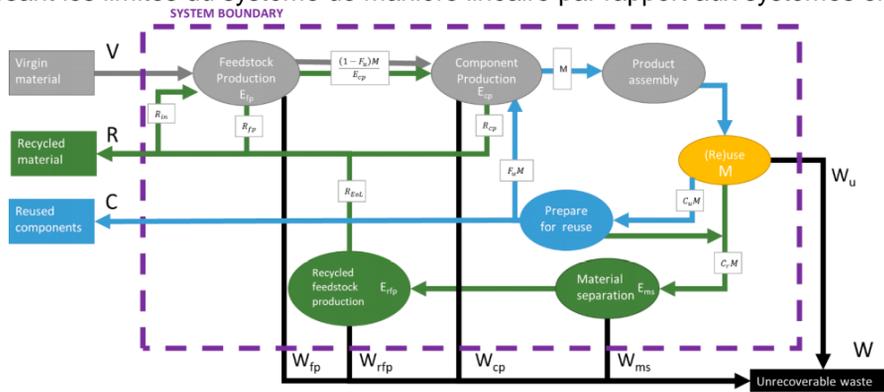
Parameter	Product Circularity Indicator
Virgin material	$V = \frac{(1-F_u)M}{E_{cp}E_{fp}}(1-F_r)$
Waste from feedstock production	$W_{fp} = \frac{(1-F_u)M}{E_{fp}E_{cp}}(1-E_{fp})(1-C_{fp})$
Waste from component production	$W_{cp} = \frac{(1-F_u)M}{E_{cp}}E_{fp}(1-E_{cp})(1-C_{cp})$
Uncollected EoL 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	$R_{in} = F_r \frac{(1-F_u)M}{E_{fp}E_{cp}}$
Recycled material recovered	$R_{out} = (1-E_{fp})C_{fp} \frac{(1-F_u)M}{E_{fp}E_{cp}} + (1-E_{cp})C_{cp} \frac{M}{E_{cp}} + E_{rfp}E_{ms}C_rM$
Recycled material (net exchange)	$R = R_{in} - R_{out} $
Reused components (net exchange)	$C = M(F_u - C_u) $
Linear Flow Index	$LFI = \frac{V+W+\frac{1}{2} R +\frac{1}{2} C }{V_{linear}+W_{linear}}$
Utility factor	$X = \left(\frac{L}{L_d}\right)\left(\frac{1}{L_r}\right) = \frac{U}{U_d}$

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



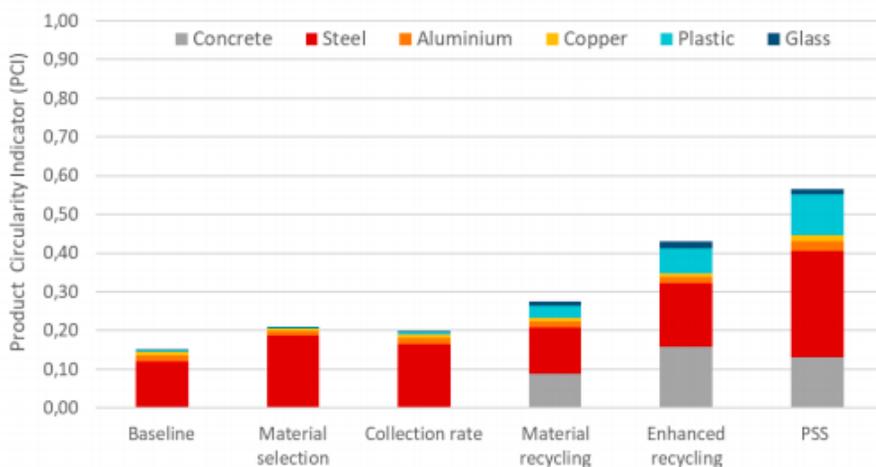
MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

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

Source : Kamp Albæk, J., Shahbazi, S., McAloone, 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.

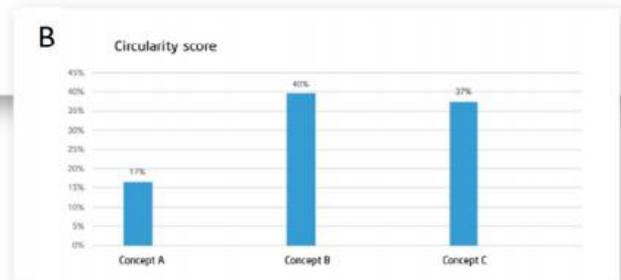
Le résultat d'un concept est donné sous forme d'un pourcentage, indiquant ainsi sa performance par rapport au score de circularité le plus élevé possible pour ce type de produit.

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

A Concept Performance

Strategies	Importance		Evaluation Parameters	Performance			Strategy scores		
	Product type	Goal		Concept A	Concept B	Concept C	Concept A	Concept B	Concept C
Raw materials and sourcing	2	3	Good environmental profile of materials	0	1	1	33%	33%	33%
			Compatibility of materials for purpose	3	3	3	100%	100%	100%
Manufacturing	3	2	Low impacting processes	2	1	2	66%	33%	66%
			Efficiency in production	3	2	3	100%	66%	100%
Product use and operation	1	1	Resource efficiency in use	3	3	3	100%	100%	100%
			Durability and robustness of product	2	2	1	66%	66%	33%
Logistics	2	2	Optimized logistics	2	3	1	66%	100%	33%
			Optimized packaging for purpose	2	2	2	66%	66%	66%
Upgrade	0	1	Access to and availability of upgrading parts	0	0	0	0%	0%	0%
			Durability and robustness of product	0	0	0	0%	0%	0%
Repair and maintain	0	1	Ease of disassembly and reassembly of worn-out parts	0	0	0	0%	0%	0%
			Product longevity and maintainability	0	0	0	0%	0%	0%
Reuse	4	2	Durability and robustness of product	2	2	2	66%	66%	66%
			Ease of cleaning	2	2	1	66%	66%	33%
Refurbish	0	1	Ease of inspection	0	0	0	0%	0%	0%
			Ease of disassembly	0	0	0	0%	0%	0%
Remanufacture	0	1	Ease of inspection	0	0	0	0%	0%	0%
			Ease of disassembly	0	0	0	0%	0%	0%
Repurpose	4	2	Compatibility of materials and design for new cycle	2	1	0	66%	33%	0%
			Ease of cleaning	2	2	1	66%	66%	33%
Recycle	2	2	Separability of materials	3	3	3	100%	100%	100%
			Material recyclability	3	3	3	100%	100%	100%
Cascade	0	3	Separability of materials	0	0	0	0%	0%	0%
			Material selection for cascading	0	0	0	0%	0%	0%
Recover	0	1	Optimized materials for recovery	0	0	0	0%	0%	0%
			Separability of resources not to be incinerated	0	0	0	0%	0%	0%

Circularity Potential Score for Product type: 47%, 45%, 37%



Aperçu de l'interface et du rendu

EXPRESSION ET CALCUL

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

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

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

- Effective (rétroactif)
- Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- Information
- Prise de décision
- Communication
- Education

Transversalité de l'application

- Générique
- Spécifique secteur

Performance évaluée

- Impacts (effets)
- Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- Matière / Produit
- Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- Maintenance & durabilité
- Réemploi / réutilisation
- Recyclage

Étapes du cycle de vie impactées

- Conception
- Production
- Utilisation
- Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

- Technosphère
- 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

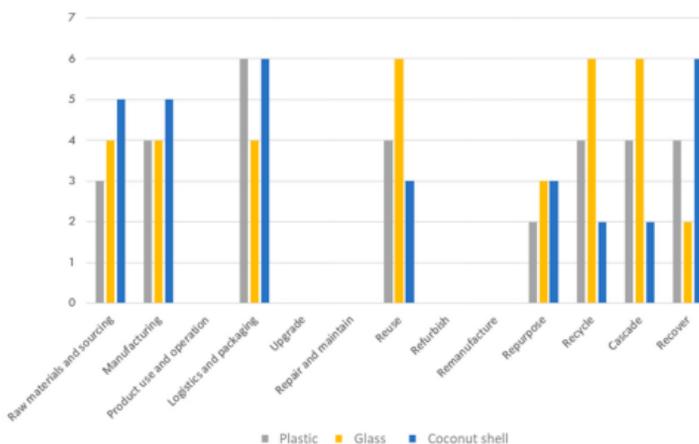


MISE EN PERSPECTIVE DE L'INDICATEUR

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 Reuse Potential Indicator (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".

Les Circularity & Longevity Indicators (CLI) combinent deux approches - la fréquence (circularité) et la durée d'utilisation (longévité) des produits - pour déterminer l'efficacité des ressources.

EXPRESSION ET CALCUL

L'indicateur de potentiel de réutilisation (RPI) 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*).

L'indicateur de longévité (CLI) se définit de la façon suivante pour un produit :

Longevity = $L_A + L_B + L_C$

Avec

L_A étant la durée de vie initiale du produit,

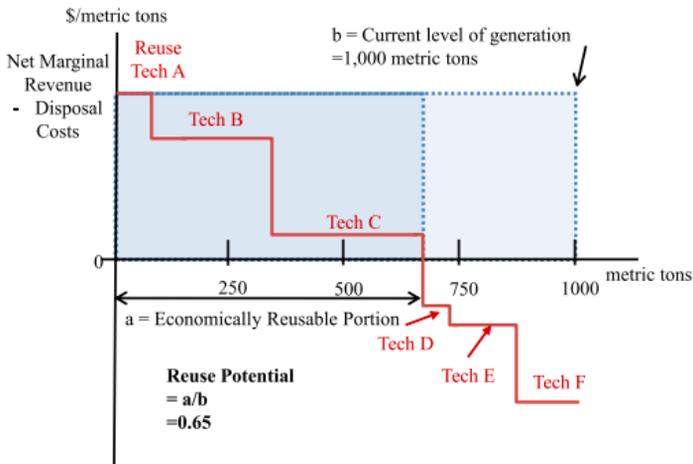
L_B la contribution de la durée de vie de réemploi, et

L_C la contribution de la durée de vie de recyclage.

L'étude de la longévité du produit permet de prendre en compte son empreinte et son taux de réutilisation et de recyclage dans la durée.

DONNÉES REQUISES (RPI)

- 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 DES INDICATEURS

Perspective de circularité

- Effective (rétroactif)
- Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- Information
- Prise de décision
- Communication
- Education

Transversalité de l'application

- Générique
- Spécifique secteur

Performance évaluée

- Impacts (effets)
- Intrinsic (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- Matière / Produit
- Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- Maintenance & durabilité
- Réemploi / réutilisation
- Recyclage

Étapes du cycle de vie impactées

- Conception
- Production
- Utilisation
- Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

- Technosphère
- Biosphère

TRANSPARENCE

Formules disponible dans les articles associés.

Article payant / Accès via base de données académique ; contacter les auteurs pour avoir accès à la documentation
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24594758/> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800917315653>

POINTS FORTS ET LIMITES

+	-
Formule simple pour le RPI	Accès à la méthodologie de calcul restreint Formules complexes pour le CLI
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

Reconnu

Intermédiaire

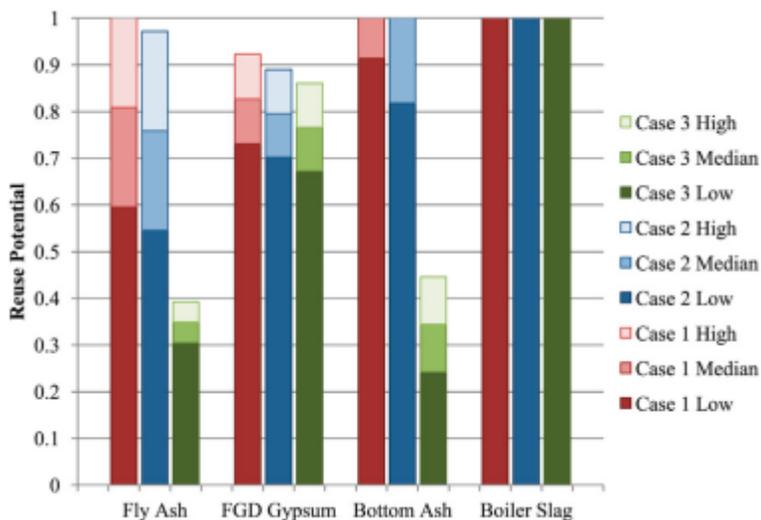
Marginal

MISE EN PERSPECTIVE DES INDICATEURS

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.

Optimisation de l'allongement de la durée de vie au regard de la performance environnementale (phase d'utilisation).

Source : Graedel, T. E.; Allwood, Julian; Birat, Jean-Pierre; Buchert, Matthias; Hagelúken, 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

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

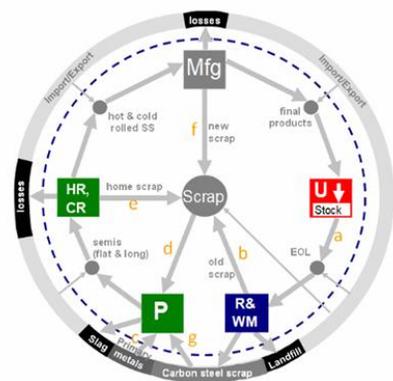
*Par « fonctionnelle », on entend « qui peut être réintroduit dans un processus de production de matières premières conduisant à la fabrication d'un matériau ou d'un alliage »

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

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

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)



Stainless Steel

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

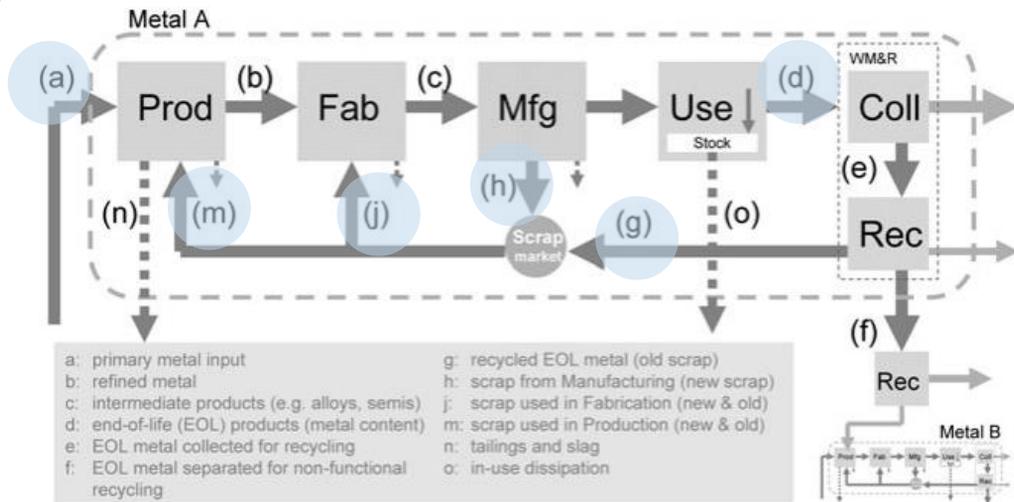
$$RC_{SS} = (d+g)/(c+d+g)$$

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

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

- Effective (rétroactif)
- Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- Information
- Prise de décision
- Communication
- Education

Transversalité de l'application

- Générique
- Spécifique secteur

Performance évaluée

- Impacts (effets)
- Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- Matière / Produit
- Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- Maintenance & durabilité
- Réemploi / réutilisation
- Recyclage

Étapes du cycle de vie impactées

- Conception
- Production
- Utilisation
- Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

- Technosphère
- Biosphère

TRANSPARENCE

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

- (CI-Qc) Effective (rétroactif)
- Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- (CI-Qc) Information
- (Qc) Prise de décision
- (CI) Communication
- Education

Transversalité de l'application

- (CI-Qc) Générique
- Spécifique secteur

Performance évaluée

- (CI-Qc) Impacts (effets)
- (CI) Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- (CI-Qc) Matière / Produit
- Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- Maintenance & durabilité
- Réemploi / réutilisation
- (CI-Qc) Recyclage

Etapas du cycle de vie impactées

- Conception
- Production
- Utilisation
- (CI-Qc) Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

- (CI-Qc) Technosphère
- (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 :

Table 1

	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

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 $\beta = 2/3$
$E_{prod,s}$	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	$\frac{\alpha \cdot (E_{prod,s} - E_{r,s}) - E_{c,s} - \beta \cdot E_{d,s}}{E_p}$

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

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

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

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

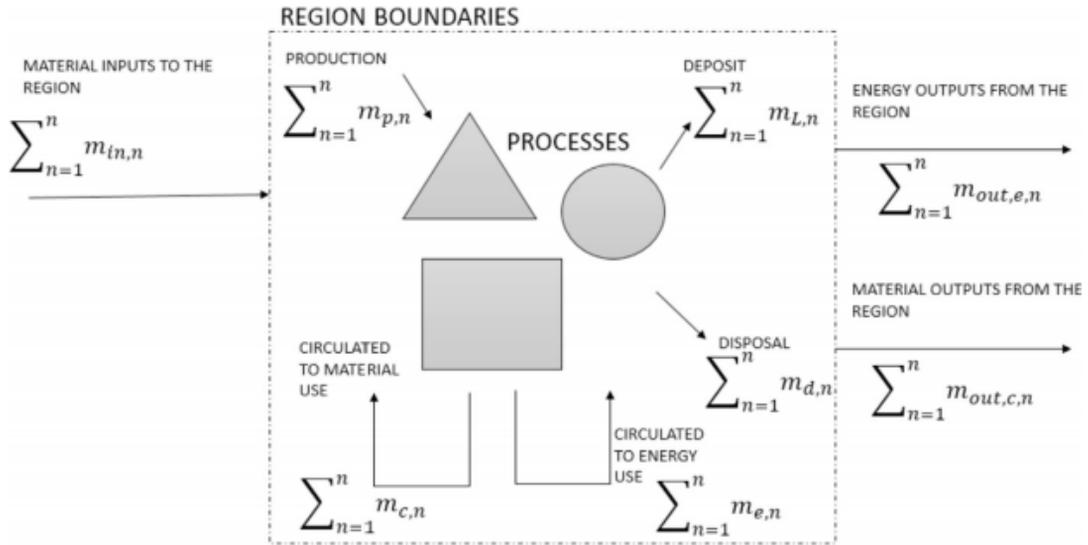
LES PARAMÈTRES À RENSEIGNER

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 Pääjät-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_{ce})	Material circulation to material use ($R_{ce, ef}$)	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 Pääjät-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 α_0 est recyclé en produit α_1 .

$$RBR_{OL,1,2015} = \frac{RCR \left(\frac{m_{v,\alpha_1}}{m_{r,\alpha_1}} V_{\alpha_1}^* - R_{\alpha_0 \rightarrow \alpha_1}^* + D_{\alpha_0}^* \right)}{V_{\alpha_0}^* + D_{\alpha_0}^*} \times 100 \quad (1)$$

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 α_1 [kg]
m_{r,α₁}: mass of recycled material used to produce the product α_1 [kg]
V_{α₁}^{}*: impact of production of virgin material for the product α_1 [impact unit/kg virgin material]
R_{α₀→α₁}^{}*: impact of recycling the product α_0 into the recycled material for product α_1 [impact unit/kg recycled material]
V_{α₀}^{}, D_{α₀}^{*}*: impacts due to production of virgin material and disposal of the product α_0 made from virgin material [impact unit/kg of product α_0]

$$RCBR_{1,2014} = \frac{m_{r,\alpha_1} (V_{\alpha_1}^* - R_{\alpha_0 \rightarrow \alpha_1}^*)}{V_{\alpha_1}^* + M_{\alpha_1,p} + U_{\alpha_1,p} + D_{\alpha_1,p}} \times 100 \quad (3)$$

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 α_1 made from virgin material [impact unit/product]

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

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

- Effective (rétroactif)
- Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- Information
- Prise de décision
- Communication
- Education

Transversalité de l'application

- Générique
- Spécifique secteur

Performance évaluée

- Impacts (effets)
- Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- Matière / Produit
- Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- Maintenance & durabilité
- Réemploi / réutilisation
- Recyclage

Étapes du cycle de vie impactées

- Conception
- Production
- Utilisation
- Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

- Technosphère
- 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=2ahUKEwiY6a27kdbwAhX14uAKHa4uBRcQFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fcyberleninka.org%2Farticle%2Fn%2F1303098.pdf&uq=AOvVaw05iyLj2MPXFsbWI4biE6m1>

- **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	<i>RBR</i> : 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

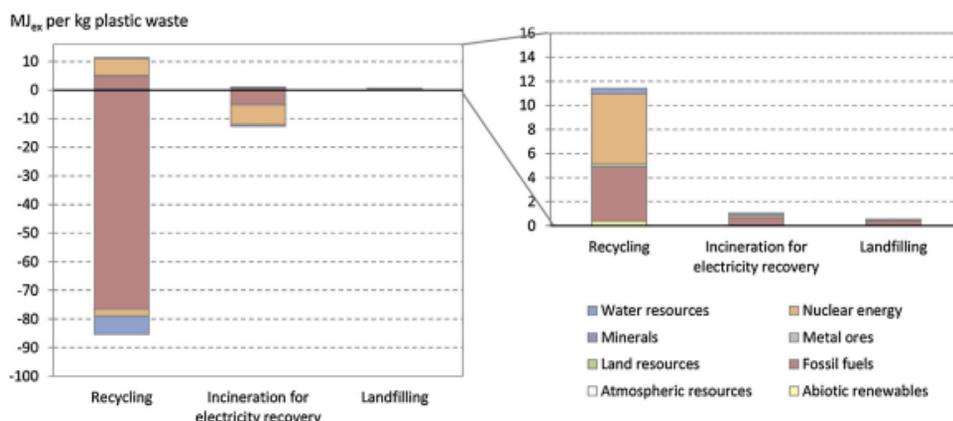
Marginal

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 proposé 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 = Σ 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

- (SEI-TCO) Effective (rétroactif)
- Potentielle (proactif)

Usage (destination)

- (SEI-TCO) Information
- (SEI-TCO) Prise de décision
- Communication
- Education

Transversalité de l'application

- (TCO) Générique
- (SEI) Spécifique secteur

Performance évaluée

- (SEI-TCO) Impacts (effets)
- Intrinsèque (flux)

PÉRIMÈTRE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE COUVERT

Niveaux de mise en œuvre

- (SEI-TCO) Matière / Produit
- Organisation / activité
- Territoire

Taille de la boucle

- Maintenance & durabilité
- (SEI-TCO) Réemploi / réutilisation
- (SEI) Recyclage

Etapas du cycle de vie impactées

- Conception
- Production
- (SEI-TCO) Utilisation
- (SEI-TCO) Fin de vie

Sphère de l'économie circulaire concernée

- (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

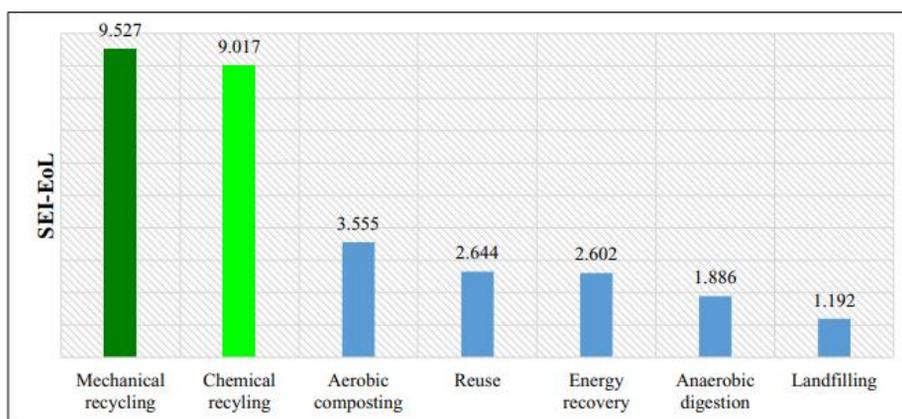
MISE EN PERSPECTIVE DES INDICATEURS

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 complémentaire: social-ACV et ACC