SCORELCA

ETUDE N° 2021-03

ECOTOXICITE : INDICATEURS, METHODOLOGIE, DEVELOPPEMENTS RECENTS ET A VENIR

SYNTHESE

Septembre 2022

Responsables scientifiques* et co-rédacteurs :

- Aurore Wermeille, Arnaud Depond, Anne-Claire Asselin*
Sayari, 6 rue Carnot, 78112 SAINT GERMAIN EN LAYE

- Magdalena Czyrnek-Delêtre*, Célia Chamillard, Florian Diot-Néant, Eugène Pipraud
I Care, 28 rue du 4 Septembre, 75002 PARIS

- Céline Gentil-Sergent
Experte toxicité

L'association SCORE LCA 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.

- 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 SCORE LCA.

- 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.

INTRODUCTION

Le sujet de la prise en compte des impacts des activités anthropiques sur les écosystèmes gagne de l'ampleur au sein de la population et des entreprises. Considérée comme l'une des cinq grandes pressions sur la biodiversité par l'IPBES *(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) (IPBES, 2019), la pollution inclut les impacts liés à l'écotoxicité des substances rejetées dans les milieux naturels.

Historiquement, l'ACV a essentiellement considéré l'écotoxicité eau douce, mais l'impact écotoxicité touche également les espèces terrestres et marines pour lesquels les indicateurs et méthodes d'évaluation sont encore peu développés. Cette prise en compte partielle des enjeux liés à l'écotoxicité, associée à des travaux et indicateurs encore limités, conduit à des résultats ACV aujourd'hui considérés peu robustes et de fait peu communiqués.

L'étude synthétisée ici avait un objectif triple :

1. Réaliser un état des lieux des indicateurs d'écotoxicité existant en ACV et des développements en cours ou à venir ;
2. Analyser les fondements de ces indicateurs, comprendre les choix méthodologiques, les modes de calculs et les utilisations possibles, en particulier à travers les logiciels d'ACV ;
3. Etablir des recommandations pour le praticien : préciser le cadre d'une utilisation juste et crédible des indicateurs existants.

Cette étude repose sur un travail bibliographique de synthèse visant à analyser les indicateur écotoxicité en ACV pour évaluer les limites des méthodes derrière et proposer des recommandations.

Le travail de l'analyse comparative a reposé sur l'étude des 5 principales méthodes utilisées en ACV et sur les publications ayant servi à élaborer ces méthodes. Ces méthodes sont les suivantes :

- USEtox 2
- Impact World+
- LC-Impact
- EF 3.0 (Environmental Footprint)
- ReCiPe 2016, dont la partie toxicité a été construite à partir de la méthode USES-LCA.

La méthode USEtox 2 est la méthode issue du consensus international UNEP-SETAC. Ce consensus international regroupe l'ensemble des chaines d'impact ACV, et pas seulement la toxicité, sous l'acronyme de GLAM (Global LCA Access to Methods). En tant que méthode issue du consensus international et reconnue par GLAM, USEtox constitue le point de départ de notre étude. Dans l'analyse, les autres méthodes sont comparées à USEtox 2.

2. ETAT DE L'ART : DESCRIPTION DES METHODES

2.1. Fonctionnement général des méthodes d'écotoxicité en ACV

Les méthodes d'Analyse d'impact du Cycle de Vie (AICV) en écotoxicité modélisent le devenir de milliers de substances issues de l'inventaire de cycle de vie d'un produit ou d'un process. A partir des quantités émises par compartiment (air, eau douce, eau de mer, et sol), elles modélisent le devenir de ces substances dans les différents compartiments (notamment les transferts entre compartiments), ainsi que les impacts de ces substances sur les écosystèmes. Toutes les méthodes modélisent les impacts des substances sur les organismes d'eau douce. Certaines modélisent également les impacts sur les organismes marins et terrestres.

Lorsque les méthodes s'arrêtent au calcul des effets potentiels sur les écosystèmes, on obtient un indicateur *« midpoint ».* Lorsqu'elles vont jusqu'à calculer les dommages faits aux écosystèmes, on obtient un indicateur *« endpoint ».*

Contrairement aux méthodes utilisées en évaluation des risques, les méthodes ACV n'évaluent pas un impact réel (qui dépend de la dose d'exposition, est site-spécifique, et prend en compte les effets de seuil), mais un impact « moyenné », sur l'ensemble du cycle de vie, en supposant un effet linéaire, et sans spécificité liée au site.

2.2. Synthèse des méthodes existantes et de leurs évolutions

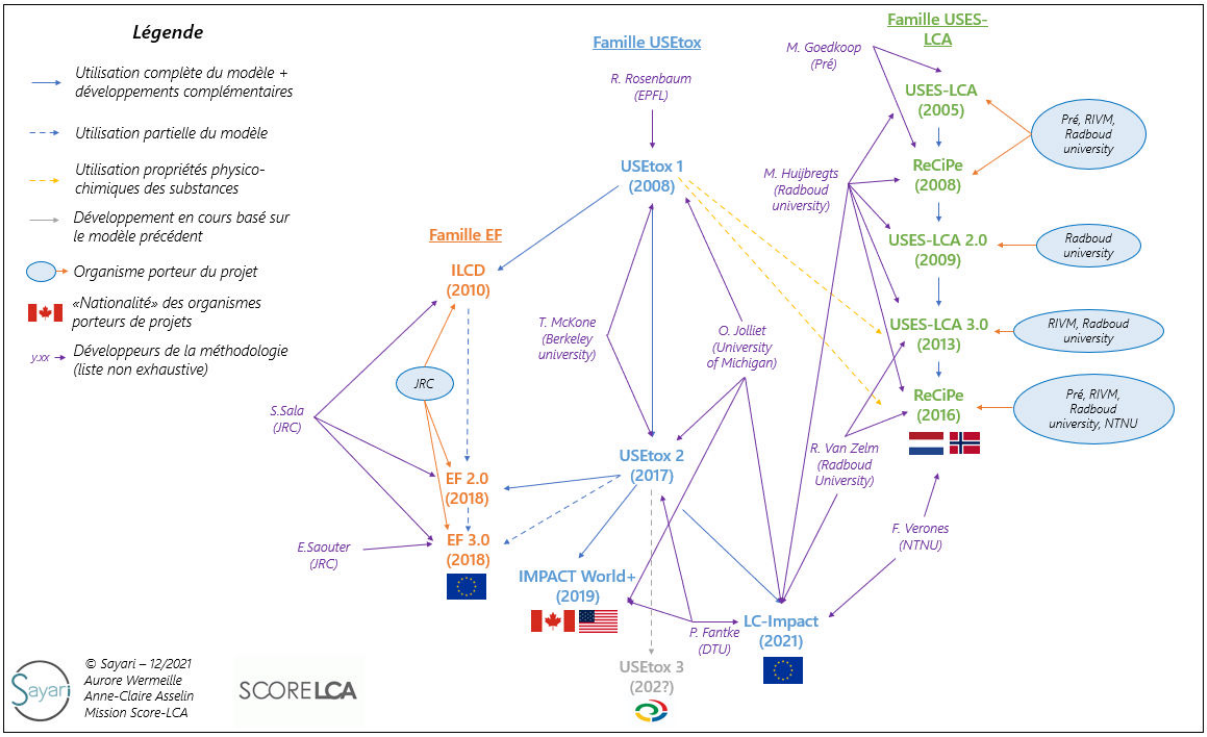


Figure 1 : Cartographie des différentes méthodes étudiées, de leurs développeurs et des méthodes sur lesquelles elles sont basées au niveau du(des) indicateur(s) écotoxicité.

La Figure 1 présente les méthodes existantes, ainsi que les principaux développeurs. Celles-ci peuvent être groupées en 3 grandes familles :

- La famille USEtox qui comprend les versions de USEtox mais également IMPACT World+ et LC-Impact qui sont majoritairement basées sur USEtox pour l'indicateur écotoxicité ;
- La famille EF qui se compose de ILCD et des 3 versions de EF et qui sont basées sur USEtox avec toutefois des modifications importantes de certaines hypothèses et données utilisées.
- La famille USES-LCA qui regroupe les différentes versions de USES-LCA et de ReCiPe.

2.3. Description des méthodes par famille

2.3.1. Famille USEtox

2.3.1.1. GLAM et la méthode USEtox 2

En 2018, les experts du consensus UNEP-SETAC se sont réunis pour formaliser un état de l'art et des recommandations pour l'évaluation de l'écotoxicité en ACV. Les résultats de cette réunion ont fait l'objet d'une synthèse et de recommandations. C'est ce que nous appelons plus loin les « recommandations de GLAM ».

Nous présentons ci-dessous (Tableau 1) les recommandations de GLAM, telles que formulées en 2018 et publiées en 2019 (UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, 2019).

Tableau 1 : Liste des recommandations de GLAM d'après (UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, 2019)

Critères de GLAM
SR 'Strongly recommended' – 'Fortement recommandés'
Cadre général d'évaluation : base sur le cadre actuel d'AICV pour évaluer les dommages sur les écosystèmes de l'émission des produits toxiques.
Baser le dommage sur la fraction potentielle d'espèces disparues (potentially disappeared fraction of species). Cependant, le lien entre la fraction affectée et la fraction disparue doit être établi.
Utiliser des données avec une origine traçable.
Utiliser les modèles d'activité de l'ion libre pour calculer les facteurs d'effet des métaux.
Prendre en compte la spéciation dans les phases solides (accessibilité) dans le calcul du facteur d'exposition pour les métaux dans le sol.
Prendre en compte la spéciation des métaux dans les phases liquides dans le calcul du facteur d'exposition pour l'eau douce, les eaux marines côtières, le sol et les sédiments d'eau douce.
Ne pas prendre en compte l'accumulation comme un mécanisme d'élimination dans tous les compartiments, lors du calcul des facteurs d'exposition.
Prendre en compte les caractéristiques spécifiques des substances, organismes et compartiments pour le calcul des facteurs d'effet.
Développer des méthodes pour prendre en compte l'exposition des pollinisateurs et les impacts afférents en AICV, du fait de l'importance de cette voie d'impact.
R 'Recommended' – 'Recommandés'
Inclure en AICV les effets écotoxiques des substances chimiques sur les organismes vivant dans les sédiments d'eau douces, dans le sol, et dans les eaux marines côtières.
Calculer les facteurs d'effet à partir de HC20 calculée en utilisant un modèle SSD construit en utilisant les équivalents EC10 chroniques.
Utiliser l'unité "comparative toxic units (CTUe) " pour l'écotoxicité comme unité pour le score d'impact.

USEtox est la méthode de consensus scientifique international, de référence, approuvée par l'initiative du cycle de vie de l'UNEP/SETAC, la Life Cycle Initiative. Sa dernière version est la 2.12, elle a été développée en 2008 par (Rosenbaum et al., 2008).

USEtox est une méthode *« single issue »*, qui est spécifique à l'écotoxicité et à la toxicité humaine. Elle ne considère pas d'autres impact.

Dans USEtox, la chaine de cause à effet (détaillée en Figure 2) pour la caractérisation de l'impact lié à l'émission d'une substance se compose de l'enchainement de 4 facteurs :

- Le **facteur de devenir** de la substance du milieu d'émission au milieu cible (fate factor), permet de convertir la quantité de substance émise ($kg_{emitted}$), en quantité de substance par compartiment environnemental (kg)
- Le **facteur d'exposition** des espèces à la substance dans le milieu cible (exposure factor), permet de modéliser l'exposition des organismes à la substance
- Le **facteur d'effet** de la substance sur la fraction des différentes espèces (effect factor), permet d'obtenir le **facteur de caractérisation (CF) «midpoint »**, exprimé en [CTUe] ou [PAF m^3 day] par kg émis (*Potentially Affected Fraction of species :* fraction potentielle d'espèces affectées)
- Et enfin le **facteur de sévérité** (severity factor) permettant de convertir la fraction potentielle d'espèces affectées en fraction potentielle d'espèces disparues, soit le **facteur de caractérisation (CF) « endpoint »** exprimée en [CDUe] ou [PDF m^3 day] par kg émis (*Potentially Disappeared Fraction of species*).

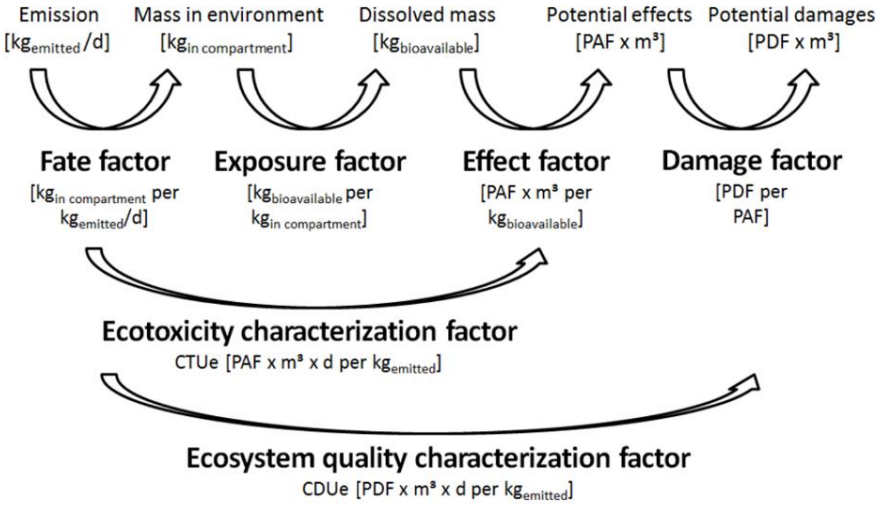


Figure 2 : Description de la méthode de calcul de la caractérisation des impacts d'écotoxicité dans USEtox, des émissions aux dommage (Fantke et al., 2017)

La majorité des méthodes AICV sur l'écotoxicité relèvent aujourd'hui de cette chaine de cause à effet, qui a été reprise dans la dernière publication de GLAM (UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, 2019). Certaines d'entre elles s'arrêtent cependant au facteur d'effet (inclus), qui est le niveau intermédiaire retenu comme « midpoint » et ne considèrent pas le facteur de sévérité qui lui, permet d'aller jusqu'au « endpoint ».

USEtox est déclinée en 2 versions : USEtox (R) et USEtox (R+I), reflétant le niveau de fiabilité des calculs (dans la modélisation et/ou la disponibilité de données sur les substances) d'une manière qualitative en indiquant si le facteur de caractérisation est « provisoire » (I : indicative) ou « recommandé » (R : recommended). L'ensemble des métaux et des substances organométalliques sont classés comme « provisoires ».

Les compartiments d'émissions pour caractériser l'impact écotoxique d'une substance sont les mêmes pour toutes les méthodes de la famille USEtox.

2.3.1.2. LC-Impact

LC-Impact (Verones et al., 2020) est une méthode exclusivement « endpoint ». Concernant l'écotoxicité, LC-Impact se base majoritairement sur la méthode USEtox 2.1 tout en y ajoutant quelques correctifs. Elle propose notamment 2 scénarios, la version « core » qui détermine les impacts à 100 ans

et la version « extended » qui détermine les impacts à l'infini (seul l'impact des métaux diffère par rapport à la version « core »), c'est-à-dire à l'état d'équilibre tel que proposé dans USEtox.

2.3.1.3. IMPACT World+

IMPACT World+ est la mise à jour des méthodes IMPACT 2002 +, LUCAS et EDIP (Environmental Development of Industrial Products), elle couvre toutes les catégories d'impact en caractérisation midpoint et endpoint. C'est une méthode dite mondialement régionalisée, proposant la même régionalisation que USEtox. L'impact de l'écotoxicité est basé sur la version paramétrée de USEtox 2.0 (R+I).

2.3.2. Famille EF

La méthode EF est portée par le laboratoire de recherche scientifique et technique de l'Union Européenne (JRC). Cette méthode permet de calculer uniquement des indicateurs midpoint. En revanche elle propose également l'agrégation des différentes catégories d'impact en un score unique. Concernant la prise en compte de l'écotoxicité, cette méthode se base sur USEtox, mais y apporte plusieurs modifications majeures. La dernière version en date, EF 3.0, se base sur la version 2.1 de USEtox tout en y ajoutant des contributions importantes sur les données utilisées, dans les calculs des facteurs d'effet (HC20 pour les substances organiques et inorganiques non-métalliques) et en y ajoutant des facteurs de robustesse (qui font débat). Un nombre important de substances et de données physico-chimiques (nécessaires à la caractérisation des CFs) ont également été ajoutées (basées sur des méthodes de calcul différentes de USEtox).

2.3.3. Famille USES-LCA

ReCiPe 2016 a été développée par van Zelm et al. (2016) et se base sur les différentes versions de USES-LCA. Cette famille de méthodes est développée par des chercheurs Hollandais et Norvégiens La méthode ReCiPe 2016 est **globale.** Sa particularité est qu'elle propose 3 scénarios « culturels » :

- « Individualist » : vision court terme (20 ans)
- « Hierarchist » : modèle consensuel, il est considéré comme le modèle par défaut (horizon temporel à 100 ans) ;
- « Egalitarian » : version long-terme (horizon infini) : c'est celui qui se rapproche le plus des autres méthodes.

Au niveau de l'écotoxicité, la méthode propose 3 indicateurs midpoint (écotoxicité eau douce, terrestre et marine) permettant de prendre cet impact en considération dans les différents milieux.

3. COMPARAISON ET LIMITES DES MÉTHODES

3.1. Comparaison des méthodes

Les méthodes ont été comparées dans leurs versions natives, correspondant à la méthodologie publiée par les développeurs de la méthode, le Tableau 2 résume les principales caractéristiques de ces méthodes d'écotoxicité, dans leur version native.

Tableau 2 : Comparaison de l'approche méthodologique des différentes méthodes retenues.

Méthodes		USEtox 2.12	IMPACT World +	LC-Impact	EF 3.0	ReCiPe 2016
Catégorie d'impact écotoxicité	*Eau douce*	x	x	x	x	x
	Terrestre	non	non*	x	non	x
	Marine	non	non*	x	non	x
Type de substances	*Organique*	x	x	x	x	x
	Inorganiques métalliques	x	x	x	x	x
	Inorganiques non métalliques	non	non	non	x	non
Nombre de substances dans les versions natives	*Organique*	2499	2499	2499	5632**	2233
	Inorganiques métalliques	27	31	27	62**	22
	Inorganiques non métalliques	0	0	0	397**	0
Horizon temporel	*20 ans*	non	non	non	non	x
	100 ans	non	non	x	non	x
	Infini	x	x	x	x	x
Niveau de calcul	*Mid-point*	x	x	non	x	x
	End-point	x	x	x	non	x
Unités des indicateurs	*Unité - mid-point*	CTUe, PAF m^3 day	CTUe, PAF m^3 day	-	CTUe, PAF m^3 day	kg 1,4-DCB
	Unité - end-point	CDUe, PDF m^3 day	PDF m^2 year	PDF m^3 day	-	species.yr
Selection des données d'effets toxicologiques	*Organique*	EC50-level	EC50-level	EC50-level	EC10-level	EC50-level
	Inorganiques métalliques	EC50-level	EC50-level	EC50-level	EC50-level	EC50-level
	Inorganiques non métalliques	-	-	-	EC10-level	-

*IMPACT World+ ne caractérise pas l'écotoxicité terrestre et marine à proprement parler. Toutefois, selon la publication méthodologique d'IMPACT World+ (Bulle et al. 2019), les impacts sur la toxicité d'eau douce peuvent être retenus comme proxy pour mesurer la toxicité terrestre et marine. Ces proxys présentent toutefois une fiabilité très discutable.

** Le nombre de substance indiqué est valable pour la version native de EF 3.0. Contrairement aux autres méthodes, le nombre de substances disponibles dans la version SimaPro (9.3.0.3) pour la méthode EF3.0 est différents. En effet, les développements méthodologiques de 2021 proposant l'ajout de nombreuses substances ne sont à l'heure actuelle pas encore implémentés dans les logiciels. Ainsi, seules 2806 organiques, 42 inorganiques métalliques et 92 inorganiques non-métalliques sont disponibles dans SimaPro (9.3.0.3) pour EF3.0.

La première différence notable au niveau des impacts sur l'écotoxicité réside dans la prise en compte de **l'écotoxicité terrestre et de l'écotoxicité marine**. Celles-ci ne sont prises en compte que dans LC-Impact et ReCiPe.

La **nature des substances** disponibles diffère également selon les méthodes. Ainsi ReCiPe ne caractérise qu'un nombre faible de métaux, dont certains sont très utilisés dans les processus industriels. Notamment, ReCiPe ne caractérise pas l'Aluminium, le Fer, le Césium, le Manganèse etc.

A contrario EF 3.0 demeure la seule méthode proposant la caractérisation de substances inorganiques non métalliques. Elle caractérise également le plus de substances, en raison de l'ajout de données provenant de la base de données REACH, originalement conçue pour l'évaluation des risques.

Le **nombre** de substances caractérisées varie également. En dehors de la méthode EF 3.0, les facteurs d'effet de l'ensemble des méthodes sont basés sur les données de USEtox. Celles-ci sont obtenues à partir de trois bases de données éco-toxicologiques : la base e-tox Base de RIVM (Institut Néerlandais de la santé publique et de l'environnement) ; la base US-EPA ECOTOX ; et la base REACH-IUCLID (ECHA (European Chemical Agency), s. d.).

En ce qui concerne les **unités**, toutes les méthodes sauf ReCiPe utilisent des unités d'impact proches : CTUe (ou PAF.m^3.day) pour le midpoint, et CDUe (PDF.m^3.day) pour l'endpoint. La méthode IMPACT World+ propose une unité différente pour ses impacts endpoint: PDF.m^2.year, exprimée en surface et non en volume, et par année. Cette unité a pour but, dans le cadre de la méthode IMPACT World+,

d'homogénéiser les unités des indicateurs utilisés pour le endpoint qualité des écosystèmes, en réalisant une normalisation pour une profondeur moyenne de 2,5 m.

Des différences existent également concernant le **type de données** éco-toxicologiques utilisées pour calculer les CFs. Les méthodes se basent sur des courbes statistiques de distribution de sensibilité (SSD) des espèces pour calculer les facteurs d'effet. Pour toutes les méthodes retenues, à l'exception de EF, ces courbes SSD sont construites à partir des valeurs de EC50 (concentration à partir de laquelle 50 % des individus sont affectés). La méthode EF 3.0 n'utilise les EC50 que pour les substances métalliques. Pour déterminer le facteur d'effet des inorganiques non-métalliques et des organiques, ce sont des courbes SSD construites à partir des courbes HC20 de EC10 (10 % des individus affectés) qui sont utilisées : cela conduit à augmenter le facteur d'effet de ces substances.

Enfin, les exigences en termes de données brutes pour la construction de ces courbes SSD diffèrent également. USEtox (et les méthodes qui en découlent) impose au minimum 3 espèces et 3 niveaux trophiques, pour les substances R (Recommandé), la substance est provisoire (I) si ces exigences ne sont pas respectées. Il en va de même pour ReCiPe, qui impose 4 espèces minimum en (I), sans qu'il n'y ait d'exigence en termes de niveaux trophiques. EF propose un score de qualité des données en fonction du nombre d'espèces et de niveaux trophiques utilisés pour calculer les courbes SSD.

3.2. Adaptation des méthodes dans les logiciels ACV

Le Tableau 3 présente les différentes versions des méthodologies disponibles dans les logiciels en date du 08.12.2021 et qui ont été utilisées pour la réalisation des cas d'étude. Depuis leur réalisation, la dernière mise à jour de SimaPro (9.3.0.3) a introduit la version 2.12 de USEtox, et la version 1.0 de LC-Impact. A noter que la méthode EF 3.0 n'a toujours pas été mise à jour dans SimaPro : les 6000 CFs calculés en 2019 ne sont donc pas encore implémentés.

Tableau 3 : Versions des méthodes natives les plus récentes et versions disponibles dans les logiciels

Méthodes	USEtox	IMPACT World+ (midpoint)	IMPACT World+ (endpoint)	LC-Impact	EF	ReCiPe (2016) (midpoint & endpoint)
Version native la plus récente	v.2.12	v. 1.31	v. 1.49	v. 1.0	3.0 (MAJ novembre 2019)	v. 1.1
Version disponible dans SimaPro *(9.2.0.2)*	v. 2.02 *(v2.12 depuis màj)*	v. 1.29	v. 1.47	Non disponible *(v1.0 depuis màj)*	v. 3.0	v. 1.1
Version disponible dans Open-LCA *(1.10.3)*	v. 2.02	v. 1.29	v. 1.47	Non disponible	v. 3.0	v. 1.1

Dans le logiciel SimaPro, les adaptations des méthodes sont majoritairement effectuées au niveau du mapping entre les sous-compartiments des méthodes natives et les compartiments et sous-compartiments disponibles dans SimaPro. La régionalisation disponible dans les méthodes natives n'est en général pas disponible dans le logiciel. D'autres facteurs correctifs peuvent également être effectués.

3.3. Cas d'étude

Deux cas d'études ont été réalisés, afin de comparer les résultats et les CFs des différentes méthodes, dans leurs versions natives et logicielles (SimaPro 9.2.02.) :

1) Comparaison de l'impact de 1 kg de substance émise (8 substances étudiées) vers les différents sous compartiments de l'air, de l'eau et du sol entre les différentes méthodes (USEtox, ReCiPe, EF, LC-Impact et IMPACT World+).

2) Comparaison de l'impact de deux jeux de données de processus (« traitement des eaux usées » et « production de maïs ») entre les différentes méthodes disponibles dans SimaPro (USEtox, ReCiPe, EF, IMPACT World+).

PRINCIPAUX RESULTATS ET ENSEIGNEMENTS

- Les métaux apparaissent comme prépondérants dans toutes les méthodes (sauf EF 3.0)
- Les CFs midpoint et endpoint sont extrêmement variables selon les méthodes
- Certaines substances ne sont pas caractérisées
  - Certains métaux ne sont pas caractérisés dans ReCiPe (Aluminium)
  - EF3.0 est la seule méthode à caractériser les inorganiques non métalliques
- L'écotoxicité terrestre et marine n'est prise en compte que dans LC-Impact et ReCiPe.

3.4. Limites des méthodes

Perspective temporelle

La perspective temporelle retenue pour calculer l'impact des substances est généralement l'infini (c'est-à-dire à l'état d'équilibre). Seuls, LC-Impact et ReCiPe proposent une comparaison avec une perspective temporelle à 100 ans.

Le choix d'un impact infini a tendance à refléter uniquement l'impact des métaux du fait de leur persistance dans l'environnement à l'infini.

Extrapolation de données de toxicité aiguës en données de toxicité chronique :

En dehors de EF 3.0, les facteurs d'effet retenus, pour une substance donnée sont basés sur des données de toxicité chroniques (correspondant à une exposition longue par rapport à la durée de reproduction de l'espèce). Or, la plupart des bases de données écotoxicologiques présentent des données correspondant à des expositions aiguës. USEtox (et les méthodes qui en découlent) convertissent les valeurs aiguës en valeurs chroniques à l'aide d'un facteur de conversion (Acute to Chronic Ratio, ACR), le plus souvent égal à 2. Cette approche est débattue : le coefficient est en effet très variable suivant la substance ; il peut varier entre 0,1 jusqu'à plus de 100 000 (Saouter et al., 2017).

Robustesse de la valeur HC50

Dans les méthodes d'écotoxicité, le facteur d'effet est calculé à partir de la valeur HC50 chronique (Hazardous Concentration 50), valeur dangereuse pour 50 % des espèces représentatives du milieu considéré. En évaluation des risques, c'est plus souvent la valeur de HC5 qui est utilisée, qui « protège » 95 % des espèces.

Sources de données

Certaines des bases de données d'écotoxicité sous-jacentes sont dynamiques : c'est le cas de la base REACH-IUCLID, où des données peuvent être ajoutées ou supprimées à tout moment.

UNEP-SETAC (Life Cycle Initiative, 2019) a relevé ce point comme une faiblesse majeure de traçabilité. GLAM recommande fortement que les données brutes sous-jacentes au calcul des facteurs d'effet puissent être sauvegardées et disponibles, indépendamment de l'évolution de la base de données sous-jacente.

Absence de prise en compte des effets de seuil et de la concentration du milieu

De par son objectif, l'approche ACV ne permet pas de prendre en compte l'exposition réelle : pas de prise en compte de la capacité de dilution du milieu, ni de la quantité de substance déjà présente dans le milieu avant émission.

Hypothèse de linéarité du facteur d'effet

L'utilisation d'une courbe concentration-réponse linéaire correspond à l'hypothèse d'additivité de la toxicité. L'hypothèse de linéarité est inhérente au fait que toute quantité d'un produit chimique émis contribuera à un impact potentiel d'écotoxicité. Cette hypothèse de linéarité surestime cependant la toxicité dans la partie inférieure de la courbe 'S' et sous-estime la toxicité dans la partie supérieure (Saouter et al., 2017).

4. ARBRES DE DECISIONS ET RECOMMANDATIONS

4.1. Arbres de decisions

Des arbres de décisions ont été construits, afin de guider le praticien dans le choix de la méthode la plus adaptée à son étude, dans le cas d'une étude portant spécifiquement sur l'écotoxicité (Figure 3), ou d'une étude multi-indicateurs (Figure 4). Le groupement tient à émettre quelques réserves quant à l'applicabilité de ces arbres : l'état de l'art évolue rapidement et il s'agit ici d'une image des méthodes et logiciels disponibles à début 2022, et c'est un guide non prescriptif, réalisé au mieux des connaissances du groupement.

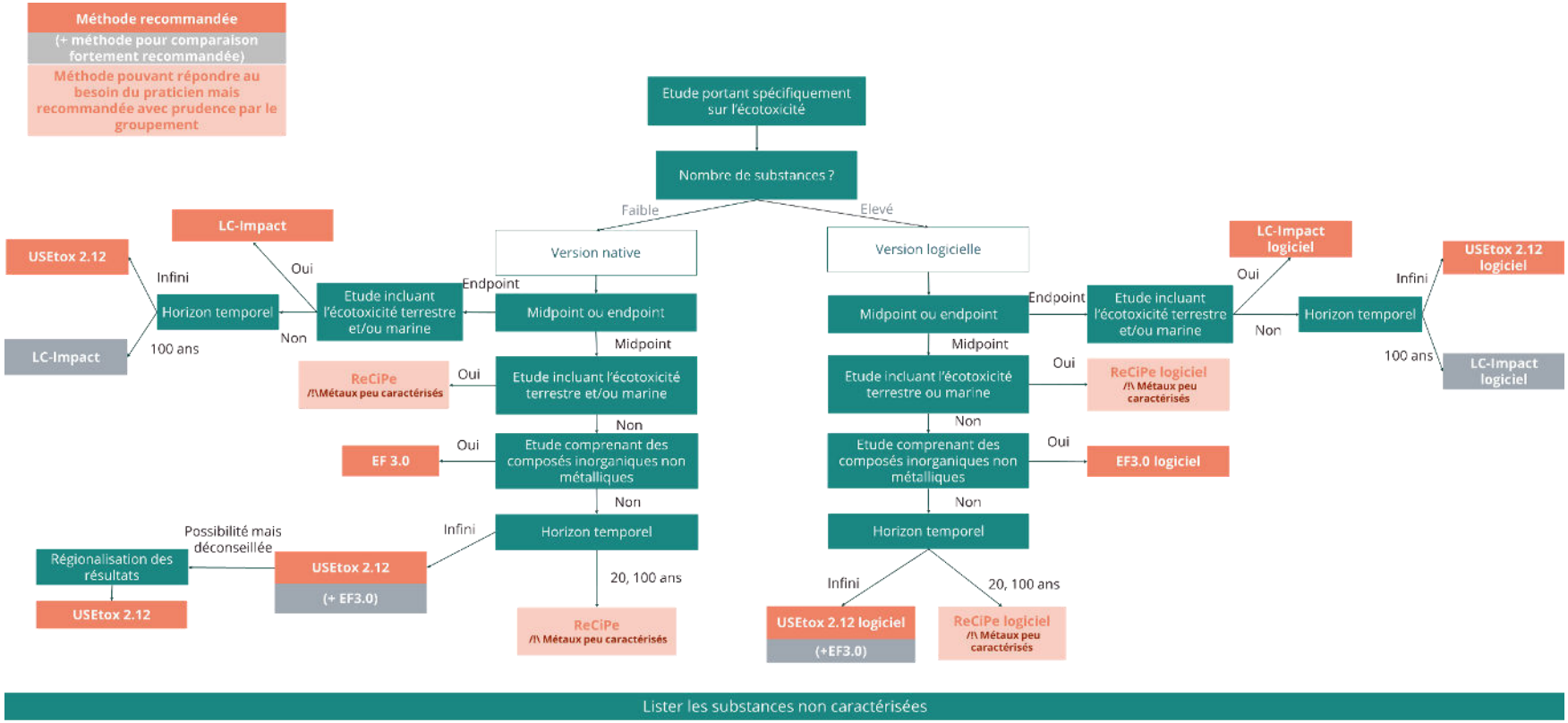


Figure 3 : Arbre de décision pour une étude portant spécifiquement sur l'écotoxicité.

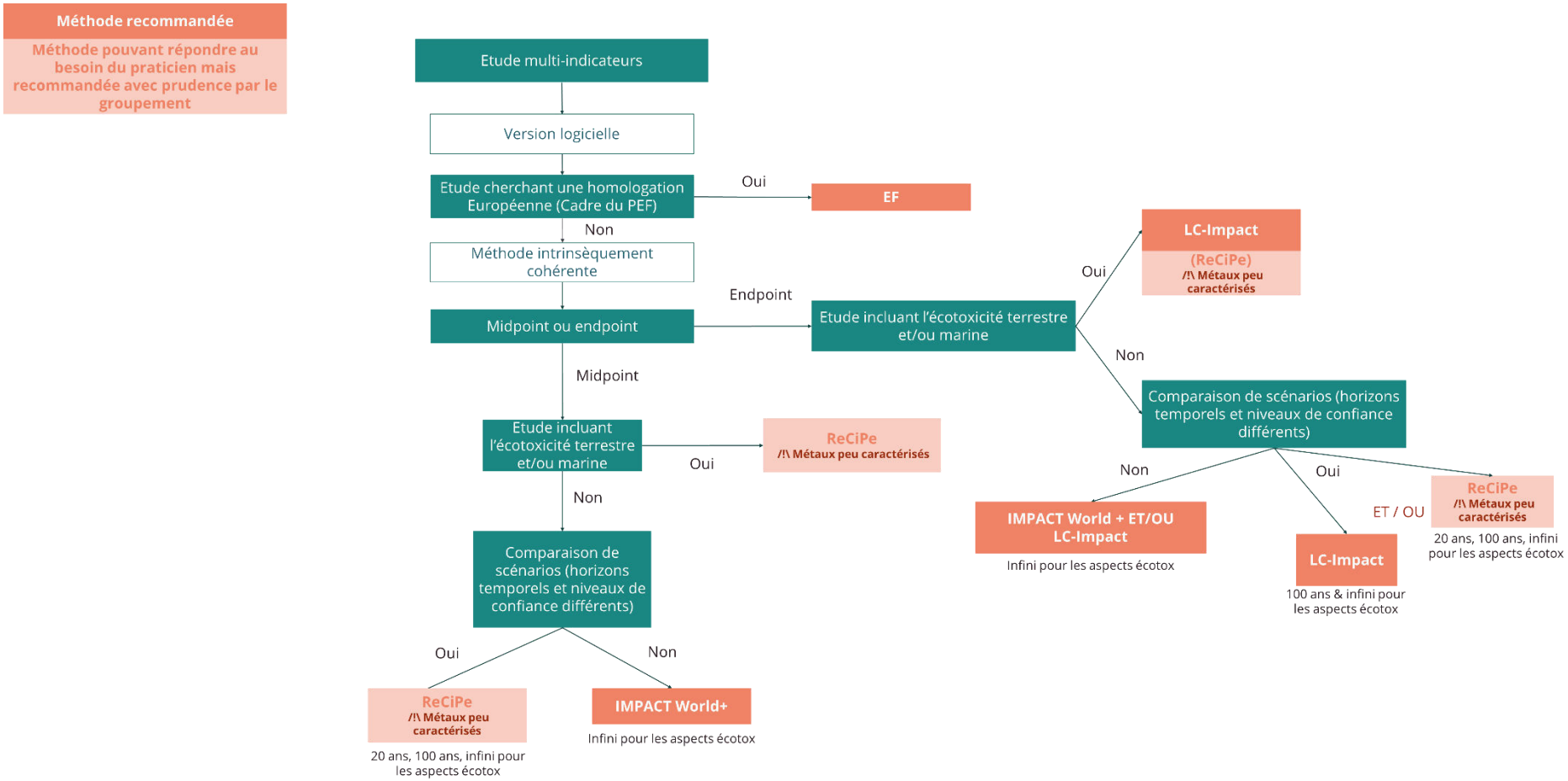


Figure 4 : Arbre de décision pour une étude multi-indicateurs incluant l'impact écotoxicité.

4.2. Recommandations

4.2.1. Sélection de la méthode d'évaluation de l'écotoxicité

- **Recommandations générales**

Le cadre ACV est clé pour l'analyse écotox et notamment :

- La bonne définition de l'objectif et du champ de l'étude :
  - Focus écotoxicité ou ACV multi-indicateurs ?
  - Etude conforme au PEF ou ACV classique ?
  - Beaucoup de substances ou peu ?
- Prendre le temps de l'interprétation car il peut y avoir de nombreuses substances :
  - Si possible, éviter les substances des catégories « unspecified »
  - Lister les substances non caractérisées
  - Caractériser les plus importantes
  - Attention aux écarts entre version native et logicielle
  - Il est recommandé d'utiliser une seconde méthode pour les projets centrés sur l'écotoxicité ou les études multi-indicateurs à enjeu écotoxicité fort.

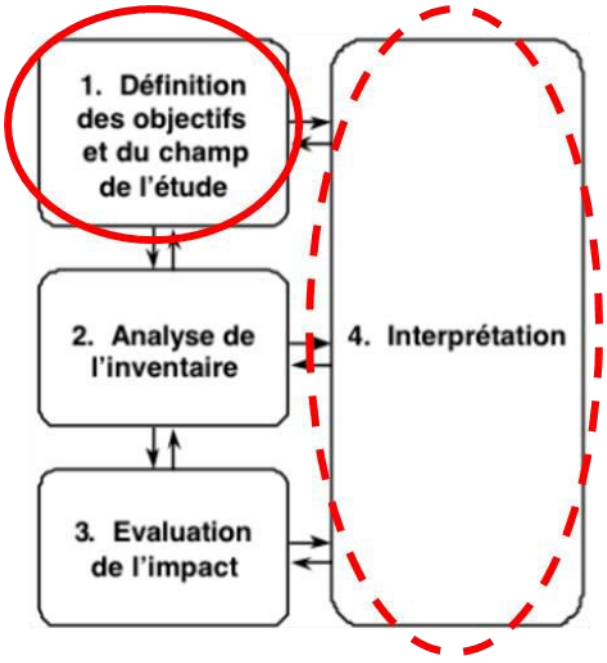


Figure 5 : Les 4 étapes de l'ACV selon les normes ISO 14040 et 14044 (source ADEME © https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv)

Les recommandations suivantes sont valables quel que soit le cadre de l'étude :

- prendre en compte l'écotoxicité en ACV, malgré les limites identifiées. Ne pas le faire rendrait l'ACV incomplète.

- vérifier si les données utilisées sont suffisamment complètes, précises, actualisées, et d'une qualité suffisante pour les substances et les compartiments considérés.
- utiliser autant que possible 2 méthodes différentes afin de comparer les résultats

- **Etude multi-impacts**

Dans le cas d'une étude multi-impacts, pour laquelle l'écotoxicité est l'un des impacts considérés, le groupement recommande l'utilisation d'une méthode globale (couvrant l'ensemble des voies d'impact), intrinsèquement cohérente (pour laquelle toutes les voies d'impact ont été harmonisées et conçues pour être comparables), au sein d'un logiciel : **LC-Impact, IMPACT World+ et ReCiPe.** La méthode EF, bien que présentée comme globale, n'est pas recommandée en multi-impacts, car elle compile de éléments de différentes méthodes, non conçues pour fonctionner ensemble.

- **Etude portant spécifiquement sur l'écotoxicité**

La méthode USEtox 2.12 est la méthode recommandée pour la prise en compte spécifique de l'écotoxicité. Il s'agit de la méthode consensus, la plus documentée et la plus transparente.

La méthode EF n'est pas recommandée en première approche : elle utilise des « facteurs de robustesse » ne faisant pas consensus, et certains facteurs de devenirs peuvent être modélisés.

- **Nombre de substances présentes dans l'étude**

Dans le cas où l'étude porte sur un nombre élevé de substances, le groupement et les experts recommandent[1] d'utiliser les versions contenues dans les logiciels en première approche, en raison de la complexité d'utilisation des versions natives.

Dans le cas d'une étude portant sur un nombre de substances plus réduit, il est conseillé d'utiliser les versions natives, dont les derniers développements ne sont souvent pas inclus dans les logiciels[2].

- **Recommandations pour l'utilisation de versions logicielles**

Dans le cas de l'utilisation d'un logiciel, il est recommandé de vérifier si la version la plus récente de la méthode utilisée y est disponible. Dans le cas contraire, il est conseillé d'affiner les résultats présentés par la version logicielle, en utilisant les versions natives pour les substances les plus utilisées dans le process, et/ou qui ressortent le plus dans l'analyse logicielle.

- **Etude visant une homologation européenne (PEF)**

Dans le cadre d'une étude cherchant à correspondre aux critères Européens (étude réalisée dans le cadre du Product Environmental Footprint, PEFCR), il est indispensable[3] d'utiliser EF3.0.

- **Etude incluant l'écotoxicité terrestre ou marine**

Seuls LC-Impact et ReCiPe caractérisent l'écotoxicité terrestre et marine. Il est recommandé d'utiliser **LC-Impact** qui propose des développements plus récents que ReCiPe (qui par ailleurs, ne caractérise pas certains métaux). Il convient toutefois de rester très prudent sur ces indicateurs car ceux-ci présentent des niveaux d'incertitude plus élevés que ceux de l'écotoxicité de l'eau douce.

- **Nombre et types de substances caractérisées par les méthodes**

---

[1] Entretien avec Peter Fantke, réalisé le 25/03/2022

[2] Le temps entre la mise à jour de la version native et la mise à jour correspondante dans les logiciels peut prendre quelques mois.

[3] Entretiens avec Erwan Saouter, Peter Fantke, Ralph Rosenbaum.

Il est recommandé de sélectionner la méthode qui caractérise le plus de substances modélisées dans le jeu d'intérêt. Par conséquent, la méthode ReCiPe est déconseillée en première approche, car elle ne caractérise pas certains métaux (Aluminium, Fer, etc.)

Dans le cas d'une étude portant spécifiquement sur l'écotoxicité, et comprenant des composés inorganiques non métalliques, **EF3.0** est la seule méthode caractérisant ces substances.

- **Cas de substances non caractérisées**

Dans le cas de substances non caractérisées dans l'inventaire (regroupées par types de substances, ou archétypes (« unspecified »), il est nécessaire de les identifier. L'utilisation de groupes de substances ou d'archétypes est déconseillée.

Il est vivement conseillé de lister les substances non caractérisées dans les méthodes utilisées, afin de déterminer si elles pourraient avoir un impact significatif sur le résultat. Si oui, il est possible pour le praticien de calculer ou faire calculer les facteurs de caractérisation et de rentrer manuellement les CFs dans les logiciels/méthodes.

- **Régionalisation des résultats**

La régionalisation des résultats n'est pas encore adaptée pour un usage opérationnel[4]. Elle n'est pas conseillée en première approche, car elle concerne le facteur de devenir. Or, l'essentiel de l'incertitude repose sur le facteur d'effet.

Dans le cas d'une étude écotox dédiée, où la régionalisation des résultats serait requise, **la méthode USEtox native est la seule possible**. Il faut néanmoins garder à l'esprit que ce travail doit être effectué dans Excel et peut s'avérer très fastidieux.

- **Scénario / horizon temporel**

LC-Impact et ReCiPe permettent de comparer des horizons temporels. Ces considérations sont secondaires par rapport au choix d'une méthode caractérisant le mieux les substances de l'étude. Ainsi, dans une étude comprenant de l'aluminium, choisir ReCiPe au lieu de USEtox (au motif que ReCiPe permet une comparaison des horizons temporels) serait une erreur car ReCiPe ne caractérise pas ce métal.

4.2.2. Interprétation des résultats

Il convient d'être particulièrement vigilant lors de l'interprétation des résultats concernant les éléments suivants :

- **Niveau d'incertitude et robustesse**

Le niveau d'incertitude et par conséquent de robustesse varie entre les méthodes et au sein des méthodes. La méthode EF3.0 propose quant à elle des CFs dont le calcul prend en compte un facteur de robustesse (qui est contesté par certains chercheurs[5]), en particulier pour les métaux.

- **Écotoxicité terrestre et marine**

Concernant l'écotoxicité marine et terrestre, il n'existe aucun consensus international sur le calcul des CFs.

[4] Entretien avec Erwan Saouter, réalisé le 21/02/2022

[5] Entretiens avec Peter Fantke et Ralph Rosenbaum

- **Absence de caractérisation de certaines substances**

Il est indispensable de mentionner une substance non caractérisée et d'en tenir compte lors de l'interprétation. Il faut également distinguer les substances non caractérisées de celles caractérisées avec un impact nul (CF = 0).

- **Analyse par types de substances**

Comme le recommande le consensus GLAM, il est important pour réaliser une étude écotoxicité d'étudier les résultats séparément pour chaque type de substances (organiques, inorganiques métalliques, inorganiques non-métalliques).

- **Domaine de validité de l'écotoxicité en ACV**

L'ACV donne un « indicateur de pression environnementale », qui est différent de la réalité toxicologique et éco-toxicologique. Par conséquent, la prise en compte de l'écotoxicité en ACV n'est pas une mesure de l'impact environnemental, mais un outil de comparaison des process et produits étudiés[6].

La prise en compte de l'écotoxicité en ACV est la plus pertinente dans le cas où l'on compare des produits de type similaire / avec des catégories de substances proches, afin de choisir l'option la moins problématique.

[6] Entretien avec Erwan Saouter, réalisé le 21/02/2022

CONCLUSION

Cette étude a permis dans un premier temps de dresser un inventaire des méthodes et indicateurs d'écotoxicité existants en ACV, puis d'analyser les fondements de ces indicateurs, comprendre les choix méthodologiques et les méthodes de calcul avant de tester les méthodes sur des études de cas, et enfin d'établir des recommandations pour les praticiens.

Les premières parties de l'étude ont mis en évidence les différences entre les méthodes d'évaluation de l'écotoxicité et la variabilité qu'il pouvait y avoir entre les résultats. Les recommandations ont donc entre autres permis de donner les clés aux praticiens pour choisir la (ou les) méthode(s) la (les) plus adaptée(s) à leurs besoins.

Ainsi, la sélection et l'application de la méthode dépendent à la fois du périmètre et des ambitions du projet (étude single- ou multi-indicateur(s), midpoint ou endpoint, substances caractérisées), mais doivent aussi se faire selon le niveau d'enjeu écotoxicité pressenti :

- Pour un projet centré sur l'écotoxicité ou multi-indicateurs mais à enjeu écotoxicité fort (Secteur des cosmétiques, agriculture, agro-alimentaire…), il est recommandé d'approfondir le travail en utilisant la version native de la méthode choisie, en comparant les résultats à l'aide d'une deuxième méthode recommandée, et/ou en cherchant à trouver dans la littérature ou développer (en interne ou à l'aide d'un expert) des facteurs de caractérisation écotoxicité si ils ne sont pas disponibles dans les méthodes.
- Au contraire, pour un projet multi-indicateurs où l'enjeu écotoxicité est moindre (ex : bâtiment, énergie), l'utilisation d'une méthode multi-indicateurs peut être suffisante. Les méthodes multi-indicateurs telles que LC-Impact, IMPACT World+ ou ReCiPe sont en effet construites dans une logique globale, permettant d'assurer une comparaison entre les indicateurs.

Dans les deux cas, il convient de rester prudent dans l'interprétation des résultats. Il est en particulier essentiel de lister les substances non caractérisées, ou les groupes de substances (COV, CSOV, COD, archétypes « unspecified »).

Les méthodes d'évaluation de l'écotoxicité ont encore des limites importantes, qui ne seront qu'en partie levées avec les mises à jour à venir devant prendre en compte les recommandations GLAM. Certains sujets seront encore à améliorer dans les années qui viennent, tels que le choix de l'horizon temporel et l'interprétation de la différence de résultats qu'il implique entre métaux et substances organiques, et la prise en compte encore très limitée des écotoxicités marine et terrestre.

Malgré ces limites reconnues, exclure l'indicateur écotoxicité d'une ACV la rendrait incomplète et pourrait conduire à ignorer un aspect important de l'impact environnemental d'un produit, dont les limites planétaires ont été dépassées (« *novel entities* » Persson et al., 2022). Pour mieux interpréter les résultats écotoxicité de l'ACV et éviter au mieux de ne pas (ou de mal) prendre en compte certains éléments, les praticiens sont encouragés à dialoguer avec les équipes d'évaluation des risques. En effet, si les deux approches ne sont pas substituables, elles devraient plutôt travailler ensemble pour s'enrichir. Il convient également de rappeler que l'ACV donne un « indicateur de pression environnementale », qui diffère de la réalité éco-toxicologique. La prise en compte de l'écotoxicité en ACV n'est pas une mesure de l'impact environnemental, mais un outil de comparaison entre process et produits.