

PRISE EN COMPTE DES PARTICULES DANS LES METHODES DE CARACTERISATION DES IMPACTS

SYNTHESE

Août 2020

Responsables scientifiques* et co-rédacteurs :

**Benoît Bulliot*, Magdalena Czyrnek-Delêtre*,
Isaure Adam, Clément Lefort et Alexis Burguburu**
I Care & Consult, 28 rue du 4 Septembre, 75002 Paris



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

La prise en compte des particules en ACV repose sur le développement de méthodes qui permettent d'intégrer dans le cadre de travail de l'analyse du cycle de vie les résultats de la recherche relatifs à l'impact des particules sur la santé et l'environnement. Les premiers travaux ayant permis de prendre en compte les particules en ACV datent de la fin des années 90 avec les travaux de Hofstetter (1998).

La prise en compte des particules évolue depuis graduellement en parallèle de la progression des connaissances scientifiques sur l'impact des particules.

Cependant, à ce jour, les méthodes ACV de caractérisation des impacts disponibles présentent des limites significatives pour traiter les problématiques sanitaires et environnementales associées aux particules. Bien que la catégorie d'impact « Particulate Matter » soit classée I (robuste) par l'ILCD, la méthode recommandée, UNEP 2016, ne couvre pas tous les aspects de ces impacts ni tous les types de particules.

D'autre part les connaissances scientifiques ont fortement progressé comme le montre les récents travaux de l'ANSES sur l'impact des particules en fonction de leur composition et de leur origine. La prise en compte en ACV de ces connaissances nécessite cependant de pouvoir quantifier de façon suffisamment précise ces impacts sur la santé et l'environnement.

L'objectif de cette étude est ainsi d'identifier comment sont pris en compte les impacts sanitaires et environnementaux des particules en ACV et en dehors de l'ACV, puis de fournir ensuite des recommandations pour une meilleure considération des particules en ACV afin d'évaluer leurs impacts sur l'environnement de façon plus précise et robuste.

Ces recommandations portent sur des préconisations concrètes à mettre en œuvre à court terme par les praticiens d'une part et par les développeurs de méthodes d'autre part. Des illustrations de ces recommandations sont également proposées sur des cas simples d'ACV.

I. Typologie et impacts des particules

1. Typologie des particules

Les particules sont principalement caractérisées par leur taille : particules grossière, fine et ultrafines, à chacune de ces tailles sont associées des origines, compositions et caractéristiques résumées dans le tableau ci-dessous

Particules	Particules ultrafines (PM _{0,1})	Particules fines (PM _{2,5})	PM ₁₀ et particules grossières
Mécanismes de formation	Nucléation/condensation	Accumulation/nucléation/condensation	Sédimentation
Composition	Sulfate Carbone élémentaire Composés métalliques Composés organiques à faible volatilité	Ions sulfate, nitrates, ammonium et hydrogène Carbone élémentaire, composés organiques à faible et moyenne volatilité Composés métalliques	Silice (SiO ₂), Poussières minérales, CaCO ₃ , CaSO ₄ , NaCl, sels marins Pollen
Sources	Combustion de biomasse et de combustibles fossiles ; Réactions atmosphériques de composés gazeux primaires	Combustion de charbon, de pétrole, d'essence Oxydation atmosphérique de NO _x , de SO ₂ et de produits organiques (dont produits biogéniques)	Fumée noire, terre (labour) chantiers de construction, carrières, Poussière de route, abrasion des pneus et freins, Embruns
Durée de vie dans l'atmosphère	Minutes à heures	Jours à semaines	Minutes à heures
Distance de dispersion	<1-10km	10 à 100 km	<1 à 10 km (100 à 1000 en cas de tempête de poussière)
Solubilité	Pas de données	Soluble	Insoluble ou faible solubilité
Pénétration dans l'arbre respiratoire	Alvéoles ; passage au travers de la barrière alvéolo-capillaire	Bronchioles terminales et alvéoles ; passage au travers de la barrière alvéolo-capillaire	Bronchioles

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des particules par taille

2. Impacts des particules sur la santé

L'étude REVIHAAP¹ de l'OMS indique que des études permettant de quantifier l'impact des particules existent principalement concernant les effets de l'exposition aux PM_{2,5} à long terme (mortalité et morbidité) et à court terme (morbidité).

L'OMS souligne que d'autres études quantitatives existent pour certains volets spécifiques d'impact sur la santé et reposent sur d'autres types de particules (notamment PM₁₀, fraction grossière des PM₁₀, carbone suie et sulfate). Cependant, l'étude souligne que l'évaluation de l'impact sur la santé sera la plus complète en considérant les PM_{2,5} dans leur ensemble. En effet les méthodes alternatives de quantification des risques ne peuvent pas être additionnées puisque les effets ne sont pas indépendants. D'autre part il n'apparaît pas qu'une particule définie par sa source ou sa composition permettrait de mieux évaluer la toxicité que cette approche massique via les PM_{2,5}.

Un autre aspect important à considérer dans le cadre de l'évaluation de l'impact des particules est que la relation concentration risque (C-R) n'est pas forcément linéaire sur la plage de concentrations à laquelle la population humaine est exposée.

3. Impact des particules sur le changement climatique

L'évaluation quantitative de l'impact des particules sur le changement climatique présente, malgré les progrès scientifiques, toujours plusieurs limites :

Actuellement **les aérosols restent la principale source d'incertitude dans le cadre de l'évaluation du changement climatique** bien que des progrès aient été récemment accomplis. Les raisons de cette incertitude tiennent à ce que les propriétés des particules ainsi que celles des nuages avec lesquels les particules interagissent varient substantiellement à une échelle beaucoup plus fine que celle qu'il est possible d'intégrer actuellement dans les modèles climatiques.

De plus, le forçage radiatif direct des particules a un **impact hétérogène selon les régions** notamment sur les changements hydrologiques et les schémas de circulation des masses d'air.

Il existe également une incertitude et une **variabilité de l'impact des particules** du fait des effets complexes de rétroaction du système climatique liés notamment à l'influence de la météo sur les émissions et la formation de particules ainsi que sur leur durée de vie.

D'un point de vue quantitatif des mesures des impacts via le Global Warming Potential (GWP) et le Global Temperature Potential (GTP) ont été développées à différents horizons. Ces facteurs ont cependant été développés au niveau des particules pour les particules primaires (Organic Carbon et Black Carbon) et au niveau des précurseurs des particules secondaires (NO_x, SO₂, VOC, CO).

Il est à noter que ces facteurs présentent de grandes incertitudes qui illustrent les difficultés d'évaluation de l'effet des aérosols sur le climat.

4. Impact des particules sur les écosystèmes

La mesure des impacts des particules sur l'écosystème passe par une compréhension fine des mécanismes de dépôt de ces particules. D'autre part la quantification des impacts des particules avec

¹ REVIHAAP – Review of evidence on health aspects of air pollution, WHO/Europe, 2013 - <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-pollution-revihaap-project-final-technical-report>

du soufre et de l'azote sur les écosystèmes ne peut se faire qu'en considérant l'ensemble du cycle de ces éléments. L'impact spécifique des particules n'est aujourd'hui pas quantifié.

Il apparaît par ailleurs que l'impact des particules sur l'écosystème est conditionné plus par sa composition chimique que par la taille et la masse totale des particules.

II. Bibliographie ACV

1. Indicateurs associés aux émissions de particules

Les méthodes d'analyse de cycle de vie retenues dans cette étude sont les suivantes :

- ILCD 2011 (International Life Cycle Data)
- ReCiPe 2016
- Impact World + 2019
- Méthode EF3.0 (PEF) basée sur la méthode développée par l'UNEP/SETAC

La première étape de ce travail bibliographique consiste à identifier, pour chacune des méthodes retenues, quels indicateurs prennent en compte les particules lors de l'évaluation des impacts environnementaux.

Seul l'indicateur « Particulate Matter / Respiratory Inorganics » prend en considération les particules, quelle que soit la méthode étudiée.

Notamment, l'indicateur « Changement Climatique » ne considère pas du tout l'impact des particules actuellement, alors que celles-ci ont un effet sur le changement climatique. A ce jour, les Near-Term Climate Forcers (NTCFs) ne sont pas caractérisés en ACV. Cependant, le rapport du GIEC fournit des facteurs pour le GWP100 (pouvoir de réchauffement global en français), ainsi que pour le GWP20 qui ne sont pas implémentés dans les méthodes actuelles.

2. Analyse théorique de la caractérisation des particules en ACV sur l'indicateur Particulate Matter

2.1. Impact Pathway

L'indicateur Particulate Matter permet de conduire à l'impact sur la santé humaine (end-point) des particules. Pour caractériser cet impact sur la santé, un impact pathway est défini.

PRISE EN COMPTE DES PARTICULES DANS LES METHODES DE CARACTERISATION DES IMPACTS

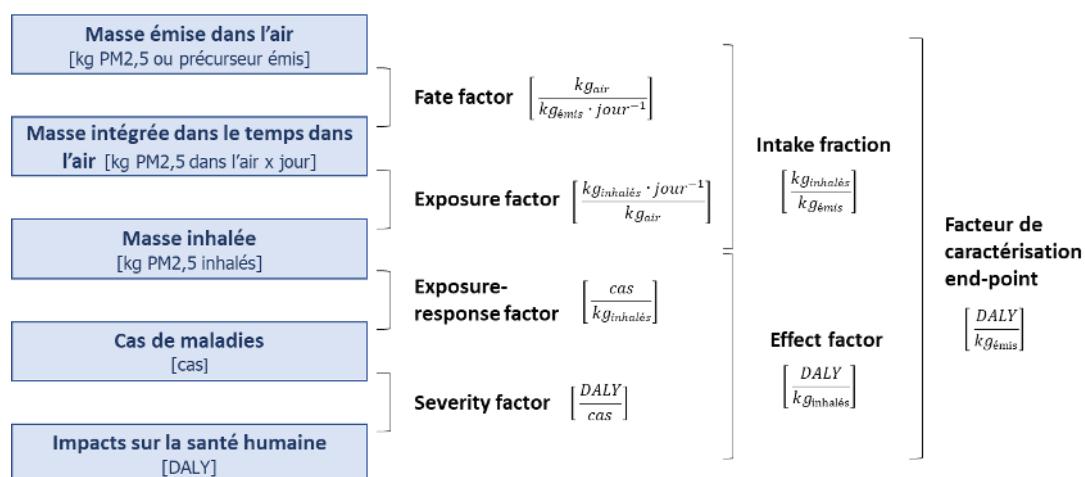


Figure 1 : Impact pathway caractérisant les effets sur la santé humaine de l'exposition aux particules en ACV (Adaptation de Haes et al., 2002 et Jolliet et al., 2004)

Cet indicateur permet donc de passer d'une quantité de particules ou de précurseurs émis à une mesure des dommages sur la santé de la population exprimée en DALY (Disability-Adjusted Life Years), unité de mesure du nombre d'années de vie en bonne santé « perdues » à cause de la maladie ou d'un décès prématuré.

Le facteur de caractérisation (CF) peut s'exprimer comme le produit d'un *fate factor* (FF), d'un *exposure factor* (EF), d'un *exposure-response factor* (ERF) et d'un *severity factor* (SF) :

$$CF = FF \cdot EF \cdot ERF \cdot SF$$

On regroupe généralement le produit du *fate factor* et de l'*exposure factor* sous le terme *intake fraction* $iF = FF \cdot EF$.

2.1.1. Intake Fraction

L'*intake fraction* traduit quelle fraction d'une quantité de particules émises finira par être inhalée par la population. La figure suivante présente une illustration théorique de l'*intake fraction*.

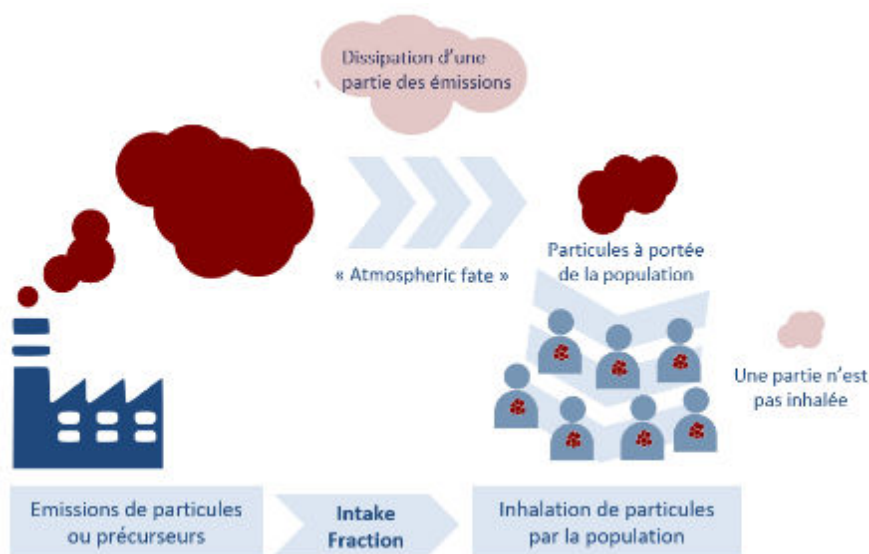


Figure 2 - Illustration théorique de l'intake fraction

PRISE EN COMPTE DES PARTICULES DANS LES METHODES DE CARACTERISATION DES IMPACTS

Des particules ou précurseurs sont émis dans l'air. Cette masse de polluant dans l'air évolue selon des paramètres météorologiques et une partie est naturellement dissipée au cours du temps. Une fois à portée de la population, une certaine partie de cette masse de polluant dans l'air est inhalée par la population. Cette part inhalée dépend notamment de la densité de population.

L'*intake fraction* se définit ainsi comme suit :

$$iF_p = \frac{\text{Masse totale de polluant émis inhalée par la population}}{\text{Masse de polluant émise}}$$

Afin de calculer les iFs, les chercheurs en ACV sur les particules fines utilisent des modèles de transport chimique pour effectuer des simulations du devenir des particules dans l'atmosphère, et couplent cela avec des données relatives à l'exposition de la population aux particules (densité de population, taux d'inhalation, ...). Deux approches existent pour effectuer les calculs d'iFs :

- **L'approche spatialisée**, qui consiste à décomposer les calculs par région en considérant les conditions locales de chaque région (avec un maillage plus ou moins fin).
- **L'approche par archétypes**, qui permettent de rassembler de nombreuses conditions locales en quelques conditions types. Dans les méthodes analysées ici, des archétypes sur la hauteur d'émissions (qui a une influence sur le fate factor) et la densité de population (qui a une influence sur l'exposure factor) sont utilisés.

Chronologie du développement des valeurs d'*intake fraction* et des méthodes ACV

Le développement des méthodes analysées dans cette étude s'est fait en continuité avec le développement des valeurs d'iFs. Ainsi, les méthodes se sont basées sur des valeurs d'iFs parmi la littérature scientifique disponible au moment où elles se développaient. La figure suivante illustre la chronologie des publications d'iFs et des publications de méthodes ACV.

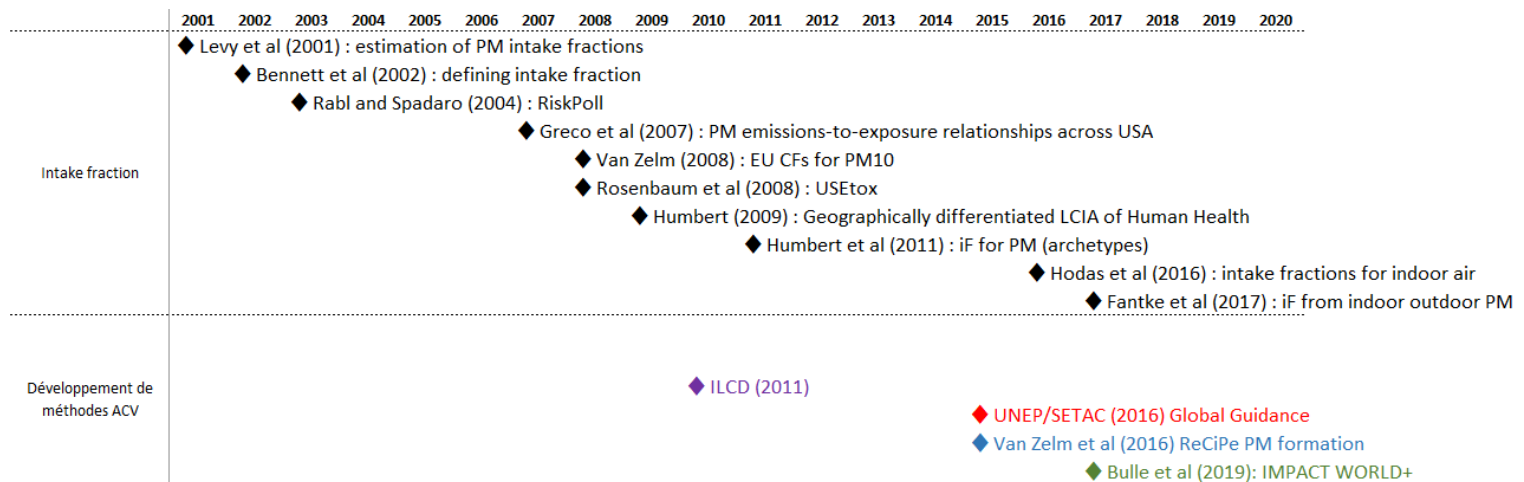


Figure 3 - Chronologie des publications d'intake fractions et de méthodes ACV

Plusieurs modèles de caractérisation se développent et établissent des iFs entre 2004 et 2008. En 2009, Humbert synthétise ces développements et vient ajouter de la finesse dans les archétypes proposés. Ses facteurs sont utilisés dans la méthode ILCD. Ils sont ensuite mis à jour et consolidés en 2011, avant d'être utilisés par la méthode Impact World+ et la méthode de l'UNEP/SETAC. La méthode ReCiPe se base quant à elle sur des facteurs spatialisés développés indépendamment par Van Zelm et ses collègues en 2008 et en 2016.

Facteurs et paramètres

« Les PM10 n'ont pas de facteur propre, mais l'IF des PM10 est calculé en appliquant un facteur à l'IF PM2.5². Ce facteur, qui correspond à la fraction des PM2,5 dans les PM10, n'est pas le même dans toutes les méthodes: ILCD et EF3.0 utilise un facteur de 23%, tandis que Impact World+ utilise un facteur de 60%. ReCiPe ne propose pas de facteur pour les PM10.

L'intake fraction permet également de décrire l'exposition au PM2,5 dites « secondaires » engendrée par des émissions de précurseurs. Les précurseurs considérés sont les mêmes pour les 4 méthodes analysées ici : les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), et l'ammonium (NH₃).

Enfin les sources d'émissions en intérieur ne sont pas considérées à ce jour. Néanmoins, des développements sont en cours sur le sujet et certains iFs ont été développés mais ne sont pas intégrés aux méthodes opérationnelles implémentées dans les outils ACV à l'heure actuelle.

2.1.2. Exposure-reponse factor

L'*exposure-response factor* (ERF) permet de passer de l'exposition (quantité inhalée par la population) aux impacts sur la santé de la population.

Méthodologie de calcul de l'ERF

Pour calculer l'ERF, les chercheurs se basent sur les résultats d'études épidémiologiques couplés à des données statistiques sur l'exposition aux particules et la mortalité à plus grande échelle afin d'obtenir un ERF le plus général possible.

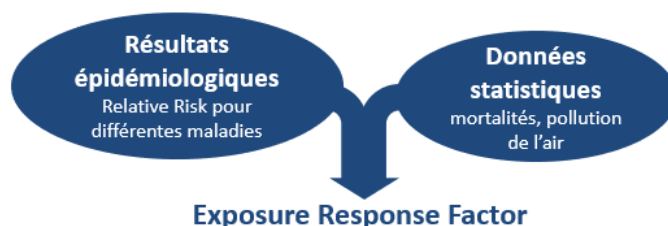


Figure 4 - Illustration du calcul de l'ERF par les chercheurs ACV

L'ERF obtenu dépend donc de paramètres déterminants tel que :

- la fonction dose-réponse considérée qui représente l'effet sur la santé en fonction de l'exposition aux particules. Elle peut être linéaire ou non-linéaire, et donc prendre en considération l'exposition initiale ou non

² Un consensus établi

PRISE EN COMPTE DES PARTICULES DANS LES METHODES DE CARACTERISATION DES IMPACTS

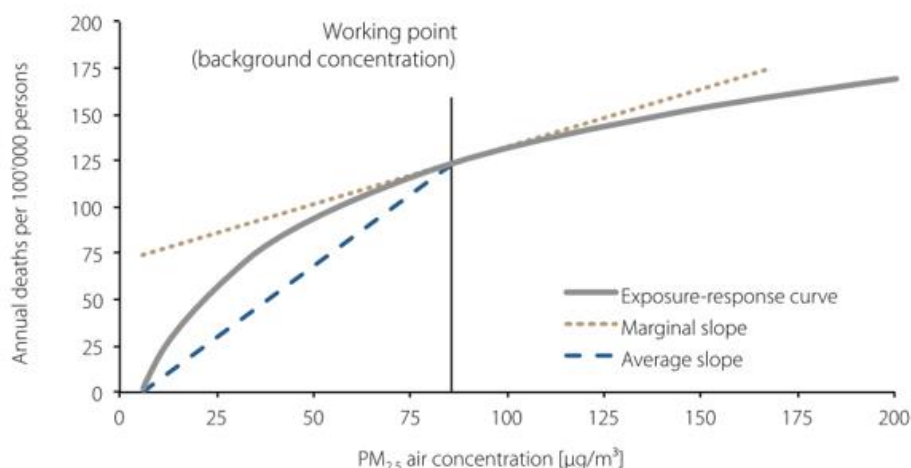


Figure 5 - Illustration d'une fonction dose-réponse non linéaire

- les maladies considérées
- la source épidémiologique utilisée

La Figure 6 illustre les différentes sources épidémiologiques et les maladies considérées sur lesquelles se basent le calcul de l'ERF de chaque méthode ACV.

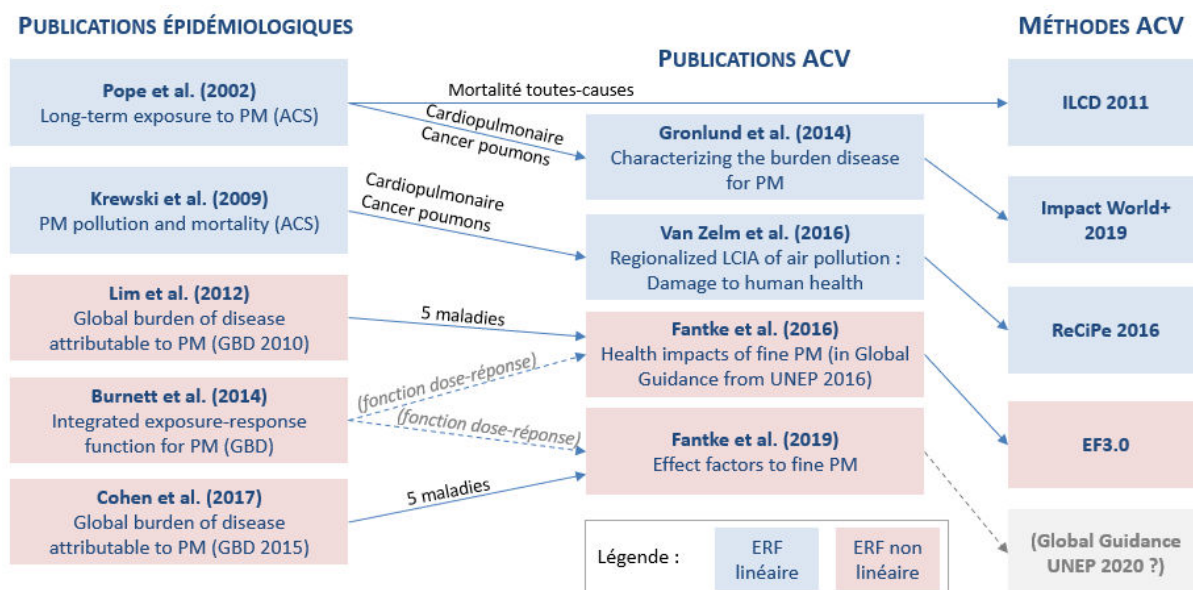


Figure 6 - Illustration des différentes sources épidémiologiques utilisées pour le calcul de l'ERF dans les méthodes ACV

Seule la méthode de l'UNEP/SETAC reprise par le JRC dans la méthode EF3.0 utilise une fonction dose-réponse non linéaire. Par ailleurs, si la méthode ILCD considérait les mortalités toutes-causes pour le calcul de l'ERF, les méthodes Impact World + et ReCiPe considèrent uniquement les maladies cardiopulmonaires et les cancers du poumons tandis que la méthode EF3.0 va un peu plus loin en prenant en compte cinq maladies³.

³Maladies cardiaques ischémiques, maladies vasculaires cérébrales, cancers des poumons / bronches / de la trachée, maladies pulmonaires obstructives chroniques chez les adultes (≥25 ans), et les infections des voies respiratoires inférieures chez les jeunes enfants (≤5 ans)

2.1.3. Severity Factor

L'*exposure-response factor* permet d'estimer le nombre de cas de maladies engendrées au sein d'une population exposée aux particules. Le *severity factor (SF)* permet d'estimer la gravité de ces effets sur la santé, en exprimant ceux-ci sous la forme d'une unité unique appelée DALY (*Disability-Adjusted Life Years*).

Pour calculer les SFs, les chercheurs se basent également sur des études épidémiologiques et des statistiques sur les mortalités et les morbidités associées à chaque maladie considérée dans la caractérisation des particules.

EF3.0 ne propose pas de facteur de caractérisation end-point, elle n'utilise donc pas de SF.

2.2. Synthèse et comparaison des méthodes

	ILCD	ReCiPe	IMPACT	PEF
Substances caractérisées	PM10 NH ₃ PM2,5 NO _x SO ₂	PM2,5 NH ₃ NO _x SO ₂	PM2,5 NH ₃ PM10 NO _x SO ₂	PM2,5 NH ₃ PM10 NO _x SO ₂
Indicateurs et unités	Mid-point : jusqu'à l'iF exprimé en kgPM2.5 eq End-point : en DALY	Mid-point : jusqu'à l'iF exprimé en kgPM2.5 eq End-point : en YLL	Mid-point : jusqu'à l'iF exprimé en kgPM2.5 eq End-point : en DALY	Mid-point : jusqu'à l'ERF exprimé en <i>disease incidence</i> End-point : pas de end-point
Archétypes	3 archétypes : <i>urban ground</i> <i>Non-urban or from high stack</i> <i>Unspecified</i>	Aucun archétype. Calcul spatialisé sur la base d'un maillage.	3 archétypes de densité de population : <i>Urban</i> <i>Rural</i> <i>Remote</i> 3 archétypes de hauteur d'émissions : <i>High stack</i> <i>Low stack</i> <i>Ground level</i> + archétype <i>unspecified</i> croisé avec tous les autres archétypes	2 archétypes de densité de population : <i>Urban</i> <i>Rural</i> 4 archétypes de hauteur d'émissions : <i>Very high stack</i> <i>High stack</i> <i>Low stack</i> <i>Ground level</i> + archétype <i>unspecified</i>
Maladies considérées	Mortalité toutes-causes Bronchites chroniques	Maladies cardiopulmonaires Cancers des poumons	Maladies cardiopulmonaires Cancers des poumons	Maladies cardiaques ischémiques Maladies vasculaires cérébrales, Cancers des poumons / bronches / de la trachée Maladies pulmonaires obstructives chroniques chez les adultes (≥25 ans) Infections des voies respiratoires inférieures chez les jeunes enfants (≤5 ans)
Etude(s)épidémiologique(s) source(s) pour l'ERF	ACS (Pope et al 2002) et Kuenzli et al 2000.	ACS (Krewski et al 2009).	ACS (Pope et al., 2002).	GBD 2010 (Lim et al., 2012)
Fonction dose réponse	Linéaire	Linéaire	Linéaire, basée sur l'étude de Gronlund et al., 2014.	Non linéaire, basée sur la publication de Burnett et al 2014.
Etude(s)épidémiologique(s) source(s) pour le SF	ACS (Pope et al 2002) et de Kuenzli et al 2000.	World health statistics 2015, WHO (World Health Organization)	GBD 2010 (Lim et al., 2012)	GBD 2010 (Lim et al., 2012)
Considération des PM10	23% du facteur PM2,5	-	60% du facteur PM2,5	23% du facteur PM2,5
Facteur unspecified	Unspecified PM2,5 est un facteur moyen	-	Unspecified PM2,5 est un facteur moyen	Unspecified PM2,5 est caractérisé par le pire facteur

PRINCIPAUX RESULTATS

- Seul l'effet sur la santé des PM_{2,5} est aujourd'hui caractérisé en ACV, toutes les méthodes se basant sur l'hypothèse que les PM_{10-2,5} n'ont pas d'effet démontré sur la santé humaine.
- Aucune méthode ne considère une granulométrie plus fine que PM_{2,5}, ce qui signifie que toutes les PM_{2,5} sont caractérisées de la même manière peu importe leur taille.
- Les sources d'émissions et la composition chimique des particules ne sont pas prises en compte.
- Deux approches existent concernant le lieu d'émission : une approche par archétype traitant ainsi des conditions types de densité de population et de hauteur d'émission, et une approche spatialisée. Cependant les facteurs spatialisés ne sont pas toujours disponibles dans les outils ACV, Seule ReCiPe utilise cette dernière approche.
- Les archétypes aujourd'hui considérés dans les méthodes opérationnelles ne comprennent pas d'archétype indoor à ce jour, bien que celui-ci soit développé dans la publication récente de l'UNEP.
- Les effets sanitaires considérés varient d'une méthode à l'autre, selon les études épidémiologiques sources utilisées, et le type de mortalité considérée : toutes-causes ou mortalité spécifique. Seul ILCD utilise la mortalité toutes causes. Les autres méthodes caractérisent entre 2 et 5 maladies.
- L'effet des particules sur la santé peut être modélisé avec deux approches : une fonction dose-réponse linéaire contre une fonction dose-réponse non linéaire. Les derniers modèles proposent une approche non-linéaire.

3. Analyse pratique de la caractérisation des particules en ACV sur l'indicateur particulate matter

3.1. Présentation de la granulométrie des méthodes

Les schémas des méthodes EF3.0, IMPACT WORLD+, ILCD 2011 et ReCiPe sont présentés dans le rapport complet. Les schémas permettent d'avoir une vision plus large de la structuration des méthodes.

Il existe un facteur de caractérisation à chaque fin de branche. Les traits en pointillés ne font pas partie des branches, ils renseignent un archétype existant mais purement équivalent à l'archétype auquel il est attaché.

3.2. Utilisation de l'archétype *unspecified*

Lorsqu'est saisie dans le logiciel ACV une émission de particules ou de précurseurs sans connaissance des conditions-types d'émissions, l'archétype *unspecified* peut être utilisé, à défaut d'utiliser un archétype plus précis. Selon les méthodes, l'attribution des facteurs aux cas « *unspecified* » ne s'est pas faite de la même façon.

EF 3.0	Approche conservatrice : facteur le plus important
Impact World +	Approche moyenne : moyenne pondérée des autres facteurs
ILCD	

3.3. Comparaison des facteurs de caractérisation end-point

Les Figure 7, Figure 8 et Figure 9 présentent une comparaison des facteurs end-point entre ILCD, Impact World+ et la méthode de l'UNEP (sur laquelle se base le mid-point de EF3.0) pour des flux susceptibles d'être souvent utilisés : le flux PM_{2,5} avec les archétypes *urban ground* et *rural high stack*, et les flux de précurseurs NH₃, NO_x, et SO₂ avec les archétypes *urban* et *rural*. La méthode ReCiPe n'est pas comparée ici car son facteur end-point n'est pas exprimé dans la même unité (YLL).

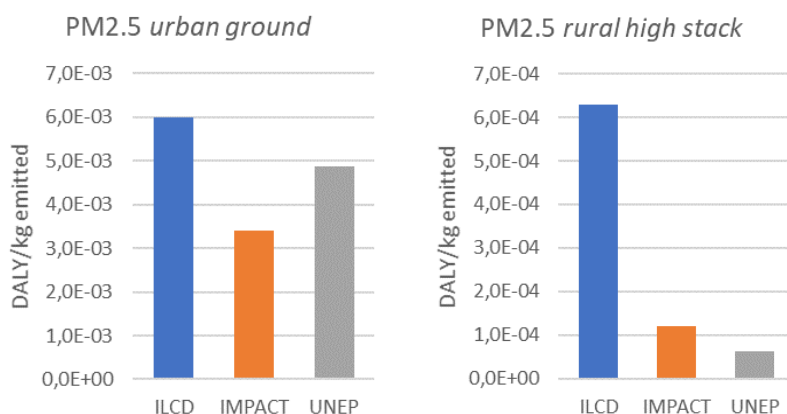


Figure 7 - Comparaison des CFs end-point des flux PM_{2,5} urban ground et PM_{2,5} rural high stack

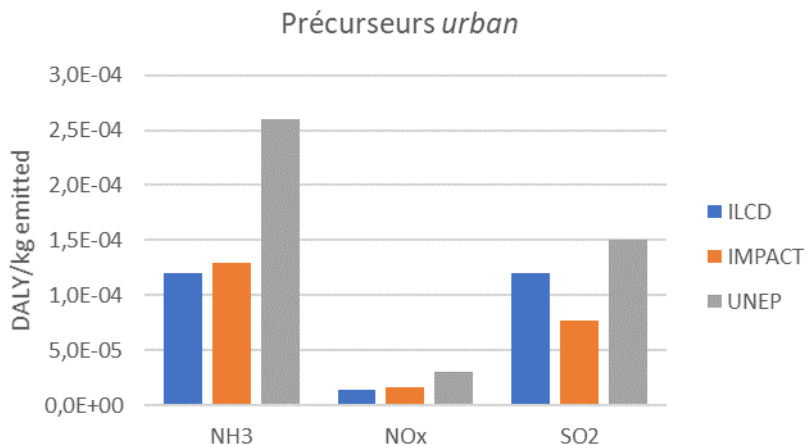


Figure 8 - Comparaison des CFs end-point des précurseurs avec l'archétype urban

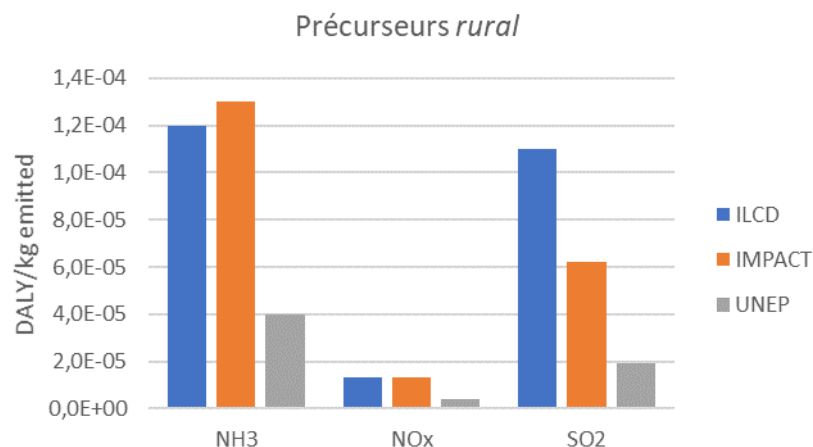


Figure 9 - Comparaison des CFs end-point des précurseurs avec l'archétype rural

Une première observation de ces trois figures permet de noter que les impacts des différentes émissions (de PM2,5 primaires ou de précurseurs, en ville ou à la campagne) ne sont pas du même ordre de grandeur, reflétant une fois de plus l'importance des archétypes, et varient significativement d'une méthode à une autre.

Pour le flux PM2,5 *rural or high stack*, le facteur utilisé par ILCD représente une réalité physique plus large et globalement plus impactante en termes d'exposition que les autres méthodes. Le CF d'ILCD est donc supérieur.

Pour les autres flux, ILCD a des *Intake Fractions* assez faibles, qui ont été revues à la hausse lors du développement d'IMPACT et des facteurs de l'UNEP. IMPACT et l'UNEP utilisent des *Intake Fractions* proches, voire identiques pour les précurseurs.

En revanche concernant l'*Effect Factor*, ILCD considère un *Effect Factor* bien plus important, en raison de la considération des mortalités toutes-causes dans les études épidémiologiques, contrairement à IMPACT et l'UNEP qui n'ont considéré que quelques causes spécifiques.

Concernant les facteurs de l'UNEP, ceux-ci sont supérieurs à ceux d'IMPACT sur le flux en ville et inférieurs sur le flux à la campagne, que ce soit sur les PM2,5 ou les précurseurs, bien que les intake fraction soient très proches.

Comme l'UNEP a considéré une fonction dose-réponse non-linéaire, l'*Effect Factor* dépend de l'archétype utilisé, il est généralement au-dessus de celui d'Impact World + pour les émissions en ville et en-dessous sur les émissions à la campagne. Il est à noter qu'il existe une incohérence dans les facteurs UNEP entre rural et urban, la fonction dose-réponse explicitée par l'UNEP décrivant un effet supplémentaire sur la santé plus faible pour une exposition initiale plus importante. Le problème ne vient pas de la fonction dose-réponse en elle-même, qui peut être appliquée entre deux lieux précis et qui donnera correctement la plus haute réponse santé au lieu le plus faible en termes de concentration. mais de l'utilisation de deux sources de données de concentration distinctes utilisées pour paramétrer les archétypes *rural* et *urban*. Elle sera corrigée dans les prochains facteurs qui seront publiés par Peter Fantke fin 2020.

En définitive, les CFs sont proches entre ILCD et IMPACT (sauf pour PM2,5 *rural high stack* où ILCD est supérieure). Les CFs de l'UNEP sont inférieurs sur les archétypes *rural*, supérieurs sur les précurseurs *urban*, et entre IMPACT et ILCD sur PM2,5 *urban ground*

III. Recommandations

1. Indicateurs Particulate Matter

1.1. Recommandations auprès des praticiens

Afin d'évaluer les adaptations à réaliser par les praticiens pour une meilleure prise en compte des particules, les recommandations s'articulent autour des grandes étapes de la norme ISO 14040-44 de l'ACV.

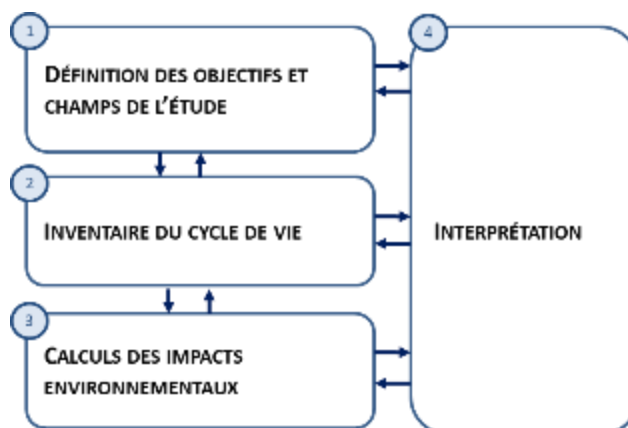


Figure 10 : Etapes de la norme ISO 14040-44

1.1.1. Définition des objectifs et champs de l'étude

 Enjeux identifiés	 Recommandations
Sujet particules mal considéré lors de la définition des objectifs et du champ de l'étude	- Identifier si le sujet particules est important, et si oui, à quelle(s) étape(s) du cycle de vie - Ajuster le niveau de détail nécessaire sur la collecte des données - Définir les frontières du cycle de vie pertinentes

1.1.2. Inventaire

▪ Collecte des données

 Enjeux identifiés	 Recommandations
- Risque de double comptage (PM10 – PM2,5) Manque de précisions des données de collecte (conditions d'émissions, ...) Données non collectées (identification en amont de la collecte des étapes importantes)	- Mener une collecte approfondie : - Etapes du cycle de vie potentiellement émettrices doivent être identifiées - La source des données doit être connue - Les conditions d'émissions doivent être identifiées (en lien avec les archétypes)

PRISE EN COMPTE DES PARTICULES DANS LES METHODES DE CARACTERISATION DES IMPACTS

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Flux disponibles dans les outils ACV mais non caractérisés dans toutes les méthodes • Manque de formulation d'hypothèses de la part du praticien | <ul style="list-style-type: none"> • Vérifier que les flux choisis sont bien caractérisés • Formuler des hypothèses lorsqu'il y a des données manquantes, notamment sur les conditions d'émission |
|--|---|

▪ Identification des processus émetteurs

 Enjeux identifiés	 Recommandations
• Utilisation de processus génériques : - Bases de données n'ont pas toujours une finesse d'analyse suffisante - Adaptation des processus génériques très peu effectuée par les praticiens	• Identifier les étapes de cycle de vie, et les processus émetteurs au-delà des données primaires • Questionner les archétypes utilisés par les processus génériques utilisés • Adapter l'inventaire pour pallier aux inexactitudes des processus génériques

1.1.3. Evaluation de l'impact cycle de vie

• Sélection des indicateurs et des modèles de caractérisation

 Enjeux identifiés	 Recommandations
• Différentes méthodes disponibles : - Hypothèses des modèles différentes - Modèles plus ou moins conservateurs - Modèles avec archétypes ou avec facteurs spatialisés - Manque global de connaissances des praticiens sur les limites des méthodes	• Nécessité que le praticien ait conscience des avantages et limites de chaque méthode afin de choisir la plus adaptée à son étude

Méthode	Commentaire
ILCD	Méthode globalement obsolète sur les particules au regard des données utilisées, des archétypes disponibles et des développements ultérieurs. Quelques points essentiels : - En l'absence de connaissance des conditions d'émissions, une approche moyenne est adoptée - Le nombre d'archétypes est limité : uniquement <i>high pop</i> et <i>low pop</i> - Le facteur pour les PM10 est moins élevé que pour la méthode Impact World + (23% du CF PM2,5 contre 60%) : cette valeur est moins conservatrice et moins consensuelle a priori
IMPACT WORLD+	Cette méthode se positionne comme une méthode complète avec des données plus récentes qu'ILCD. Les nombreux archétypes, si bien utilisés, permettent une analyse relativement fine. Quelques points essentiels : - C'est l'une des méthodes les plus précises dans le cas où l'on dispose d'une connaissance fine des conditions d'émissions car beaucoup d'archétypes sont disponibles

PRISE EN COMPTE DES PARTICULES DANS LES METHODES DE CARACTERISATION DES IMPACTS

	- Seule méthode qui permet de combiner les archétypes de manière exhaustive : très utile si la connaissance des conditions d'émissions est imparfaite (connaissance de la hauteur d'émission mais pas du lieu par exemple) - En l'absence de connaissance des conditions d'émissions, une approche moyenne est adoptée - Les données sont néanmoins moins récentes que celles utilisées pour la méthode PEF, notamment pour l'<i>effect factor</i>, plus faible que pour le PEF (moins de maladies considérées, etc.) - Les PM10 sont caractérisés avec une valeur de 60% des PM2,5 ce qui semble plutôt faire consensus aujourd'hui
EF3.0	Méthodologie la plus aboutie dans l'approche avec des données plus récentes, plus de maladies considérées, une fonction dose réponse non-linéaire pour plus de précision pour les hautes concentrations, etc. Néanmoins, un problème dans l'homogénéité des données considérées conduit à des facteurs non cohérents pour l'archétype rural ce qui est une limite importante. Quelques points essentiels : - C'est l'une des méthodes les plus précises dans le cas où l'on dispose d'une connaissance fine des conditions d'émissions car beaucoup d'archétypes sont disponibles mais le problème sur les facteurs « rural » nuance fortement ce point - En l'absence de connaissance des conditions d'émissions, une approche conservatrice est adoptée - Le facteur pour les PM10 est moins élevé que pour la méthode Impact World + (23% du CF PM2,5 contre 60%) : cette valeur est moins conservatrice et moins consensuelle a priori
ReCiPe	ReCiPe propose une approche spatialisée, ce qui diffère fortement des autres méthodes. - Un inventaire spatialisé est nécessaire - A utiliser uniquement si l'outil d'ACV comprend les facteurs spatialisés ou intégration des facteurs spatialisés nécessaire - Ne pas utiliser cette catégorie d'impact dans le cas d'une utilisation de ReCiPe avec des facteurs non spatialisé

1.1.4. **Interprétation du cycle de vie**

• **Analyse des résultats**

 Enjeux identifiés	 Recommandations
• Méconnaissance de l'indicateur Particulate Matter de la part des praticiens ACV : interprétations peu pertinentes voire inexistantes • Incertitudes et limites dans la caractérisation des particules pas assez considérées dans l'interprétation des résultats d'impact	• L'ACV est une démarche itérative : nécessité de s'interroger sur les résultats et notamment les processus contributeurs afin d'aller affiner/modifier l'inventaire • Nécessité de développer la formation des praticiens ACV

• **Vérification**

 Enjeux identifiés	 Recommandations
• Une erreur sur le choix du flux a une forte influence sur les résultats d'impact (Ex : ordres de grandeur x100 entre PM2,5 urban ground et PM2,5 rural high stack)	• Effectuer une ou plusieurs analyses de sensibilité sur les émissions de particules • Identifier les données imprécises • Identifier le paramètre à faire varier - Donnée quantitative de flux - Type de particule - Archétype utilisé

1.2. Recommandations techniques auprès des autres acteurs

1.2.1. Développement des facteurs de caractérisation

 Enjeux identifiés	 Recommandations
• Aucun facteur indoor dans les méthodes ACV opérationnelles actuelles • Les derniers facteurs indoor développés ne concernent que les émissions liées à la cuisine et au chauffage • Choix des archétypes parfois difficiles par manque d'information sur les conditions (hauteur d'émissions, densité population) • Le phénomène de précurseurs limitants n'est pas considéré à l'heure actuelle	• Approfondir le développement de facteur indoor • Etudier la possibilité de développer des facteurs indoor pour d'autres sources d'émissions • Etudier l'option des archétypes liés aux sources d'émissions (par secteurs) • Approfondir et intégrer le phénomène de précurseurs limitants

Développements en cours identifiés

Les derniers articles de Peter Fantke⁴ développent de nouveaux intake fraction et de nouveaux effects factor incluant des facteurs indoor. Ces deux articles seront combinés courant 2020 afin de proposer de nouveaux facteurs de caractérisation, intégrant ainsi des facteurs indoor et corrigeant l'incohérence actuelle entre les facteurs *rural* et *urban*.

1.2.2. Développement de bases de données

 Enjeux identifiés	 Recommandations
• Inventaires parfois imprécis concernant les émissions de particules. • Tous les archétypes disponibles dans les méthodes ne le sont pas dans les bases de données	• Travailler avec les bases de données afin que celles-ci intègrent de manière plus précise les archétypes afin de permettre un déploiement efficace de la finesse des méthodes

⁴ Fantke et al. 2017 et Fantke et al. 2019

1.2.3. Développement des outils ACV

 Enjeux identifiés	 Recommandations
Facteurs de caractérisation spatialisés non disponible dans certains outils ACV	Implémenter dans les outils ACV tous les facteurs de caractérisation spatialisés développés dans les méthodes

1.3. Recommandations de gouvernance auprès des acteurs de l'ACV

 Enjeux identifiés	 Recommandations
- Facteurs de caractérisation parfois peu intelligibles pour les praticiens - Plusieurs groupes de recherche développent des CFs parfois en parallèle : -> disparités entre les méthodes de caractérisation des particules, par exemple dans le vocabulaire et les unités utilisées.	Développer la coopération entre les différents acteurs afin de rendre plus intelligibles les méthodes par les praticiens (<i>ex. facteurs UNEP repris dans le PEF</i>) - Améliorer la transparence concernant les hypothèses de calcul et la théorie utilisée pour le développement des facteurs et méthodes de caractérisation.

2. Autres indicateurs

2.1. Changement climatique

 Enjeux identifiés	 Recommandations
- Aucun impact des particules considéré dans les méthodes actuelles Existence de facteurs à travers les GWP100 ou GWP20 du GIEC des NTCFs : non implémentés dans les méthodes actuelles et rarement ajoutés « à la main » par le praticien	Praticien : Affiner la collecte des données afin de décomposer l'inventaire par composition Ajouter ces flux dans la modélisation et y associer les facteurs de caractérisation à partir des valeurs GWP100 et GWP20 du GIEC Evaluer l'impact sur le changement climatique en veillant à mener une analyse de sensibilité avec les facteurs GWP20 Développeurs : Intégrer des facteurs de caractérisation basés sur les valeurs du GIEC

2.2. Ecosystèmes

Les données en Qualité de l'Air concernant l'impact des particules sur les écosystèmes ne sont pas encore assez matures pour effectuer des recommandations en ACV sur ce sujet.

Conclusion

La première partie de cette étude a permis de réaliser un état de l'art sur la manière dont sont appréhendées les particules en qualité de l'air et d'identifier les enjeux associés, notamment en termes de santé publique. La seconde partie de l'étude a permis de réaliser un état de l'art exhaustif de leurs prises en compte dans les méthodes actuelles d'ACV et d'en identifier, en synthèse, les limites actuelles.

Cette prise en compte repose ainsi sur le développement de méthodes qui permettent d'intégrer les résultats de la recherche relatifs à l'impact des particules sur la santé et l'environnement. Les premiers travaux ayant permis de prendre en compte les particules en ACV datent de la fin des années 90 avec les travaux de Hofstetter (1998). Depuis, grâce à la recherche scientifique sur l'impact des particules sur la santé d'une part, et les avancées dans le développement des méthodologies ACV d'autre part, différentes méthodes ont vu le jour, se basant sur différentes publications scientifiques.

Cependant, les méthodes ACV de caractérisation des impacts disponibles présentent certaines limites pour traiter les problématiques sanitaires et environnementales associées aux particules tandis que parallèlement, les méthodes existantes sont bien souvent peu maîtrisées par les praticiens ACV.

Ainsi, cette étude a montré qu'il existe un double-enjeu sur la prise en compte des particules en ACV, retranscrits dans les recommandations apportées :

- Un enjeu d'amélioration des méthodes existantes : les méthodes actuelles présentent encore certaines lacunes, notamment sur l'intégration de l'impact des particules en air intérieur, les phénomènes associés à la formation de particules secondaires, l'articulation des archétypes, etc. qui nécessitent de poursuivre la recherche afin de rendre plus robustes les facteurs existants et de pouvoir considérer un plus grand nombre de situations ;
- Un enjeu d'amélioration des pratiques : les praticiens maîtrisent aujourd'hui relativement mal la méthode *Particulate Matter* et le premier degré d'amélioration de la prise en compte des particules en ACV est entre les mains des praticiens ACV. En effet, si le développement de facteurs plus robustes est essentiel, cela n'a que peu d'effet si les méthodes sont mal exploitées par le praticien. Ainsi, il est particulièrement important de développer la formation sur ce sujet afin que la communauté ACV monte en compétence de manière globale.

Enfin, ces améliorations des facteurs et des pratiques nécessitent, de manière plus transversale, un dialogue entre les différents acteurs, et ce à plusieurs niveaux :

- A l'échelle des développeurs de méthodes, pour une meilleure cohérence entre les différents travaux, une meilleure lisibilité pour le praticien et une plus grande transparence sur les choix méthodologiques ;
- A l'échelle globale des parties prenantes de l'ACV : développeurs de méthodes, bases de données, concepteurs d'outils et praticiens, afin que les avancées puissent être intégrées de manière cohérente et transverse.