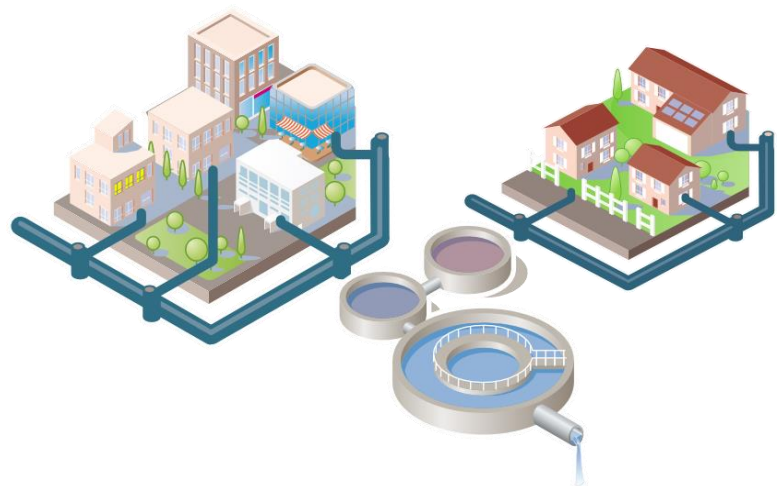


Analyse, limites et perspectives de la prise en compte des micropolluants dans l'ACV du traitement des eaux usées

Rapport d'étape
Version finale corrigée



Laureline CATEL, Eva RISCH, Philippe ROUX

Mars 2016

Contexte de programmation et de réalisation

L'efficacité d'une station de traitement des eaux usées se mesure classiquement par la qualité de ses rejets dans les milieux aquatiques. Mais ce traitement est obtenu avec pour conséquences d'autres impacts environnementaux qui se produisent lors de la construction, de l'exploitation, du fonctionnement et du démantèlement du système d'assainissement dans sa globalité. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) environnementale est la seule méthode d'évaluation, capable de quantifier ces impacts sur l'ensemble du cycle de vie du système. Associée à des approches plus locales telles que les études d'impacts qui prennent mieux en compte les spécificités du site, l'ACV permet d'éviter les transferts de pollution.

Afin que l'ACV puisse devenir progressivement un indicateur supplémentaire décisionnel d'un choix objectif, il convient de l'appliquer progressivement aux différents systèmes d'assainissement tout en améliorant la méthodologie. C'est dans ce contexte que l'ONEMA a confié à l'Irstea cette action visant à développer les connaissances et à proposer des outils et des méthodes autour de l'approche ACV des systèmes d'assainissement.

Ce rapport doit être considéré comme un « Rapport d'étape » présentant l'avancée des travaux réalisés en 2014 dans le cadre de l'action 39 de la convention ONEMA-Irstea 2013-2015. Les travaux présentés ici se poursuivent en 2015 dans le cadre de cette action. En l'état, ce rapport doit donc être considéré comme « Rapport d'étape » et ne pas être diffusé à l'extérieur en l'état avant la relecture et validation du COPIL ONEMA (d'où son statut « confidentiel »).

Les auteurs

Laureline Catel¹, Eva RISCH¹, Philippe ROUX¹

1. Irstea Montpellier (34), UMR ITAP, pôle ELSA (www.elsa-lca.org)

Les correspondants

Onema : Alice Reuillon alice.reuillon@onema.fr

Irstea : Philippe Roux, Irstea Montpellier, UMR ITAP, pôle ELSA, philippe.roux@irstea.fr

Droits d'usage :	Accès libre
Couverture géographique :	France
Niveau géographique :	National
Niveau de lecture :	Public Onema-Irstea et COPIL
Nature de la ressource :	Rapport d'étape

**Analyse, limites et perspectives de la prise en compte des micropolluants dans l'ACV
du traitement des eaux usées**

Rapport d'étape

Laureline CATEL, Eva RISCH, Philippe ROUX

Sommaire

1. Contexte de l'action ONEMA n°39	6
2. Abréviations.....	8
3. Introduction.....	8
4. Croisement des listes de substances analysées dans le projet AMPERES avec celles caractérisées dans les méthodes d'impacts ReCiPe et USEtox	11
5. Intégration de nouvelles substances dans le logiciel ACV4E.....	14
5.1. Méthodologie	14
5.2. Influence sur les résultats d'ACV	19
6. Prise en compte en ACV des pathogènes contenus dans l'eau	23
7. Conclusion	24
8. Références.....	25
9. Annexes	27

**Analyse, limites et perspectives de la prise en compte des micropolluants dans l'ACV
du traitement des eaux usées**

Rapport d'étape

Laureline CATEL, Eva RISCH, Philippe ROUX

Résumé

Le présent rapport d'étape concerne la prise en compte des micropolluants dans l'analyse environnementale de cycle de vie (ACV) des stations d'épuration (STEP). Ces substances sont actuellement peu ou pas incluses dans de telles études ACV pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le pouvoir toxique de nombreuses substances n'est pas caractérisé en ACV. D'autre part, les connaissances disponibles sur la composition des eaux usées et sur les rendements épuratoires des STEP concernant ces substances sont perfectibles. Ce rapport vise à recenser l'état des connaissances scientifiques récentes sur le sujet ainsi que les données opérationnelles disponibles dans la littérature. Il propose au final une liste de substances à inclure dans le logiciel ACV4E développé par Irstea dans le cadre de la présente action ONEMA.

MOTS CLES

Analyse du cycle de vie, traitement des eaux usées, micropolluants, contaminants sanitaires

Analyse, limites et perspectives de la prise en compte des micropolluants et des pathogènes dans l'ACV du traitement des eaux usées

Rapport d'étape

Laureline CATEL, Eva RISCH, Philippe ROUX

Abstract

This progress report focuses on the inclusion of micropollutants in the environmental life cycle assessment (LCA) of wastewater treatment plants (WWTP). Currently, few of these substances are included in such studies for several reasons. First of all, the toxicity of many substances is not evaluated in LCA. Moreover, available knowledge about wastewater composition and wastewater treatment efficiencies for these substances needs to be improved. This report reviews current scientific knowledge and operational data available in literature on this topic. Finally it provides a list of substances to be included in the software ACV4E developed by Irstea within the framework of the current ONEMA action.

KEY WORDS

Life cycle assessment, wastewater treatment, micropollutants, pathogens

**Analyse, limites et perspectives de la prise en compte des micropolluants dans l'ACV
du traitement des eaux usées**

Rapport d'étape

Laureline CATEL, Eva RISCH, Philippe ROUX

1. Contexte de l'action ONEMA n°39

Le présent rapport correspond au livrable du volet 3 de l'action 39 : Améliorations envisageables du cadre de l'ACV (tant sur les inventaires des rejets eau/air/sol que sur l'évaluation des impacts eutrophisation & écotoxicité eau douce). Rapport d'étape.

Cette action est associée depuis 2014 à la Chaire Industrielle ELSA-PACT (www.elsa-pact.fr) qui regroupe des partenaires académiques et industriels. Nous tenons à remercier ici l'ONEMA, financeur de l'action ainsi que l'ensemble des partenaires qui apportent leur soutien à la Chaire : ANR, Région Languedoc Roussillon, SUEZ environnement, BRL, SCP, UCCOAR-Val d'Orbieu, et EVEA.



SOCIÉTÉ DU CANAL DE PROVENCE
ET D'AMÉNAGEMENT DE LA RÉGION PROVENÇALE



Rappel de la position du volet 3 dans l'action 39 :

- **Action 39** : ACV du système d'assainissement
 - **Sous-action 1** : Développement d'outils et de méthodologies pour l'ACV
 - **Volet 3** : **ACV des traitements complémentaires dont les micropolluants**
 - **A3a** : Etat de l'art scientifique et propositions concernant une meilleure prise en compte des **polluants émergents** et autres substances mal caractérisées dans les ACV.
 - **A3b** : Etat de l'art scientifique et propositions pour une meilleure prise en compte des **contaminants sanitaires** mal caractérisés dans les ACV (échelle macroscopique type épidémiologie versus approche « biologique »).

Les travaux relatifs à ce volet se poursuivront en 2015 en parallèle aux deux autres volets de la sous-action 1 :

Volet 1 – Amélioration du calculateur simplifié ACV4E (maquette de faisabilité réalisée en 2012) et réalisation d'ACV complémentaires pour enrichir ses bases de données.

Volet 2 – Evaluation environnementale des effets combinés de la gestion des eaux pluviales & eaux usées domestiques (gestion unitaire/séparatif en lien avec les accidents et débordements, ACV des ouvrages pluviaux). Cette action inclura des travaux méthodologiques pour une meilleure prise en compte en ACV des dynamiques temporelles dans l'évaluation des impacts eutrophisation et écotoxicité eau-douce en ACV afin de permettre une meilleur différentiation entre rejets accidentels et rejets diffus (en liens avec la gestion du pluvial).

2. Abréviations

ACV : Analyse du Cycle de Vie

AMPERES : Analyses de Micropolluants Prioritaires et Emergents dans les Rejets et les Eaux Superficielles

CTO : Composés Traces Organiques

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

ETM : Eléments Traces Métalliques

FC : Facteur de Caractérisation

ILCD : The International Reference Life Cycle Data System

MES : Matières En Suspension

STEP : Station d'épuration

3. Introduction

La DCE (CE, 2000) définit le Bon Etat des masses d'eau en fixant, entre autres, des seuils de concentrations pour un grand nombre de substances dont des micropolluants (métaux, pesticides, pharmaceutiques, hydrocarbures, etc.). La plupart de ces micropolluants font aussi partie des substances prioritaires à suivre telles que définies par la DCE.

Le Tableau 1 présente des exemples de composition de différents types d'eau pour les nutriments et quelques ETM. Il rassemble de façon synthétique différentes sources de données ou de prescriptions et permet ainsi de fournir au lecteur des ordres de grandeur de concentrations pour différents types d'eau. Les ressources d'eau naturelles sont classées selon les différents états écologiques définis par la DCE (très bon, bon, moyen, médiocre).

Tableau 1. Exemples de composition de différents types d'eau pour les nutriments et quelques ETM. Unité : mg/L. Source : adapté de Loubet, 2014

		Natural water resources					Produced water	Raw wastewater			Drinking water plant effluent	Wastewater plant effluent		
Water		WFD : very good state	WFD : good state	WFD : moderate state	WFD : poor state	Seine river	Drinking water	French context WW	ecoinvent WW	(Henze & Comeau 2008)	DWP effluent France	WWT effluent France	WWT effluent ecoinvent	
Sources →		Voir légende					(AESN 2014)	(SEDIF 2012)	Irstea	(Doka 2009)	(SEDIF 2012)	(SIAAP 2012)	(Doka 2009)	
Pollutants		CAS												
Physicochemical parameters	COD	-	2.00E+01	3.00E+01	3.00E+01	3.00E+01	1.77E+01	3.50E-01	6.46E+02	1.55E+02	1.20E+03	1.17E+01	5.50E+01	2.75E+01
	BOD	-	3.00E+00	6.00E+00	6.00E+00	6.00E+00	2.09E+00	3.00E+00	2.65E+02	1.04E+02	5.60E+02	3.00E+00	1.30E+01	8.15E+00
	Total Phosphorus (Pt)	7723140	5.00E-02	2.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	1.57E-01	1.00E-02	9.40E+00	3.07E+00	2.50E+01	5.00E-01	9.00E-01	8.49E-01
	Ammonium ion (NH4+)	14798039	1.00E-01	5.00E-01	2.00E+00	5.00E+00	8.75E-01	3.00E-02	5.49E+01	1.92E+01	9.64E+01	1.00E-01	9.51E+00	1.10E+01
	Nitrate (NO3-)	14797650	1.00E+01	5.00E+01	5.00E+01	5.00E+01	2.45E+01	1.81E+01	2.50E+00	4.65E+00	1.11E+00	3.18E+00	4.25E+01	4.83E+01
	Nitrite (NO2-)	14797650	1.00E-01	3.00E-01	5.00E-01	1.00E+00	5.16E-01	1.00E-02	4.00E-01	1.31E+00	8.21E-01	6.00E-02	1.00E-01	6.44E-01
Micropollutants	Cadmium (Cd)	7440439	7.50E-05	7.50E-05	1.50E-04	1.50E-04	7.50E-05	1.00E-08	2.54E-04	2.81E-04	4.00E-03	7.50E-05	2.81E-04	2.81E-04
	Mercury (Hg)	7439976	2.50E-05	2.50E-05	5.00E-05	5.00E-05	1.63E-05	1.00E-08	5.36E-04	2.00E-04	3.00E-03	1.50E-04	2.00E-04	2.00E-04
	Arsenic (As)	7440382	2.10E-03	2.10E-03	4.20E-03	4.20E-03	1.01E-03	1.00E-08	1.49E-03	9.00E-04	2.10E-03	2.10E-03	4.20E-03	4.20E-03
	Aluminium (Al)	7429905	1.00E-01	1.00E-01	2.00E-01	2.00E-01	1.00E-01	1.00E-08	1.20E+00	1.04E+00	1.00E+00	1.36E+00	1.04E+00	1.04E+00
	Iron (Fe)	7439896	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02	1.00E-08	1.60E+00	7.09E+00	5.00E-02	5.00E-02	7.09E+00	7.09E+00
	Chromium (Cr)	7440473	1.70E-03	1.70E-03	3.40E-03	3.40E-03	7.49E-04	1.00E-08	1.35E-02	1.22E-02	4.00E-02	1.70E-03	1.22E-02	1.22E-02
	Copper (Cu)	7440508	7.00E-04	7.00E-04	1.40E-03	1.40E-03	2.25E-03	1.00E-08	8.49E-02	3.74E-02	1.00E-01	3.82E-03	3.74E-02	3.74E-02
	Lead (Pb)	7439921	3.60E-03	3.60E-03	7.20E-03	7.20E-03	3.60E-03	1.00E-08	2.31E-02	8.63E-03	8.00E-02	8.10E-04	8.63E-03	8.63E-03
	Zinc (Zn)	7440666	3.90E-03	3.90E-03	7.80E-03	7.80E-03	8.01E-03	1.00E-08	1.88E-01	1.09E-01	3.00E-01	9.80E-03	3.24E-02	3.24E-02

En vert : valeurs correspondant aux valeurs seuils des classes définies par la DCE. Source : Ministère de l'écologie et du développement durable, 2005.

En bleu : valeurs déterminées selon la méthode décrite en annexe 8.1.

Les systèmes d'assainissement ont un rôle important à jouer dans l'atteinte du bon état des masses d'eau dans la mesure où ils concentrent les polluants contenus dans les eaux usées et que la qualité de leurs rejets impacte directement les cours d'eau en aval des stations d'épuration. Or le suivi des substances prioritaires en entrée et en sortie des STEP est encore peu réalisé actuellement. Dans ce contexte, il est donc actuellement difficile en ACV de prendre en compte les efficacités épuratoires des STEP, et par conséquent les ACV de ces systèmes comportent des lacunes car les impacts des rejets ne sont que partiellement pris en compte. A cela s'ajoute le fait qu'un certain nombre de substances ne sont pas encore caractérisées¹ par les méthodes d'impacts d'ACV, bien que les listes de substances ne cessent de croître. C'est aussi le cas des organismes pathogènes, qui commencent seulement à être étudiés dans le cadre de l'ACV.

Concernant le logiciel ACV4E, seuls trois CTO (dichlorométhane, simazine, 2,4-dichlorophénol) et quatre ETM (cadmium, mercure, nickel, plomb) sont actuellement pris en compte dans les impacts environnementaux des systèmes d'assainissement.

Dans ce contexte, les objectifs de ce rapport sont les suivants :

1. Faire une **analyse des données disponibles** sur les micropolluants dans le cadre de l'ACV du traitement des eaux usées.
2. **Augmenter la liste des micropolluants à prendre en compte dans l'ACV** du traitement des eaux usées afin d'obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité et plus justes vis-à-vis de la discrimination des différents types de traitement. Implémenter cette liste dans le logiciel ACV4E développé dans le cadre de la présente action.
3. Tester cette liste sur un premier cas d'étude afin d'identifier la contribution de ces micropolluants aux résultats et d'évaluer les transferts de pollutions entre les rejets de la station d'épuration et les autres compartiments d'émission (air et sol).

¹ Un facteur de caractérisation en ACV permet de convertir (par multiplication) un flux de polluant émis dans l'eau, l'air ou le sol en un indicateur d'impact (écotoxicité, toxicité, eutrophisation, changement climatique, etc.).

4. Croisement des listes de substances analysées dans le projet AMPERES avec celles caractérisées dans les méthodes d'impacts ReCiPe et USEtox

Les limites à l'introduction des micropolluants dans les ACV de systèmes d'assainissement sont de deux ordres :

- i. Nécessité de disposer de connaissances sur la **composition des eaux usées** et sur les **efficacités épuratoires** des STEP.
- ii. Nécessité que les **substances soient caractérisées** dans les méthodes d'ACV, c'est à dire que leur pouvoir d'impact sur l'environnement soit quantifié (écotoxicité, toxicité, eutrophisation, changement climatique, etc.).

Dans ce contexte, et afin de répondre aux objectifs et d'identifier les substances pouvant être prises en compte dans le cadre de l'ACV du traitement des eaux usées, les critères suivants sont à prendre en compte :

- **Critère 1 : Substances possédant des facteurs de caractérisation (FC) dans les méthodes d'impacts ACV, liés à des émissions dans l'eau ET dans le sol**, afin de pouvoir évaluer les impacts à la fois des rejets de station et de l'épandage des boues. Nous avons limité l'étude à deux méthodes : ReCiPe (Goedkoop, 2009) (méthode utilisée dans le logiciel ACV4E) et USEtox (Rosenbaum, 2008) (méthode la plus aboutie concernant la caractérisation de la toxicité des substances en ACV).
- **Critère 2 : Substances dont les rendements épuratoires sont connus**. Nous avons ciblé les trois types de traitements les plus répandus en France d'après l'ONEMA (2010) : boues activées en aération prolongée (37 % des stations), lagunage naturel (26 % des stations) et filtres plantés de roseaux (9 % des stations). Les rendements épuratoires utilisés sont issus des résultats du programme de recherche AMPERES (Analyses de micropolluants prioritaires et émergents dans les rejets et les eaux superficielles) qui s'est déroulé de 2006 à 2009.

Remarque : Le choix de la méthode de caractérisation des impacts dans le logiciel ACV4E s'est porté sur ReCiPe pour plusieurs raisons :

- Volonté de pouvoir aller si nécessaire jusqu'à des indicateurs de dommages (end-point), ce qui implique d'utiliser la même méthode intégrée allant d'indicateurs mid-point à des indicateurs end-point pour assurer une cohérence.
- L'objectif du logiciel ACV4E est principalement de révéler aux utilisateurs les transferts de pollutions, notamment le fait que les polluants contenus dans les eaux usées sont convertis en émissions gazeuses ou sont transférés dans les boues. Sachant qu'en France l'épandage est la principale voie d'élimination/valorisation des

boues (pour 70 %), il paraissait indispensable que la méthode de caractérisation des impacts ACV retenue inclue de l'écotoxicité terrestre afin de quantifier les impacts potentiels liés à ce transfert de polluants vers les sols à travers les boues.

C'est dans ce contexte que le choix s'est porté sur la méthode ReCiPe, qui est l'une des méthodes les plus utilisées dans les publications scientifiques (même si dans cette méthode la catégorie d'impact « écotoxicité terrestre » est considérée comme « interim² » par l'ILCD).

Notons que la méthode USEtox est plus consensuelle pour l'évaluation de l'écotoxicité aquatique, mais elle n'intègre pas d'écotoxicité terrestre. USEtox a aussi l'énorme avantage de partager son modèle (combinant des facteurs d'effet, de devenir et d'exposition) sous la forme d'un fichier Excel. Ceci permet de calculer de façon transparente des facteurs de caractérisation lorsque ceux-ci sont absents des autres méthodes d'impacts (bien entendu si les paramètres biophysiques et d'écotoxicité indispensables au paramétrage du modèle sont disponibles).

112 substances ont été étudiées : les 45 substances prioritaires (60 en comptant les isomères) et les 9 autres polluants réglementés par la DCE (CE, 2013), plus 58 autres substances suivies dans le projet AMPERES et correspondant aux catégories « autres métaux » (21 substances) et « autres substances organiques » (22 substances) (Choubert, 2011). Chaque substance a été analysée au regard des deux critères définis précédemment (facteurs de caractérisation et rendements épuratoires disponibles). Des groupes de substances, associés à un code couleur, ont été établis en fonction des profils de réponses aux critères ; ils sont présentés dans le Tableau 2. L'analyse complète des substances et leur répartition dans ces groupes sont présentées en annexe 9.2.

Tableau 2. Groupes de substances en fonction des critères d'analyse. O : oui, N : non.

Groupes	AMPERES	ReCiPe		USEtox	
	Rendements épuratoires pour les trois procédés de traitement	FC existants pour les émissions eau	FC existants pour les émissions sol	FC existants pour les émissions eau	FC existants pour les émissions sol
1	O	O	O	O ou N	O ou N
2a	O	N	O	O	O ou N
2b	O	O	N	O ou N	O
3	O	N	N	O	O
4	O	N	N	N	N
5	N	O ou N	O ou N	O ou N	O ou N

² L'ILCD considère comme « interim » les facteurs de caractérisation qui ont atteint une qualité suffisante pour être utilisés dans le cadre des normes ISO 14040 et 14044, mais qui nécessitent encore des améliorations et des travaux scientifiques pour être consolidés et engendrer des résultats plus robustes.

Groupe 1 : Substances répondant positivement à tous les critères et pouvant être incluses directement dans le logiciel ACV4E. L'existence de FC avec USEtox n'est pas nécessaire.

Groupe 2 : Substances ne possédant qu'un seul FC sur les deux (eau ou sol) dans la méthode ReCiPe. Le facteur manquant existe dans la méthode USEtox, ce qui permettrait de le convertir en FC adapté à la méthode ReCiPe. Ces substances pourraient donc être incluses dans ACV4E.

Groupe 3 : Substances ne possédant aucun FC dans la méthode ReCiPe. En revanche des FC existent dans USEtox, ce qui permettrait de les convertir en FC adaptés à la méthode ReCiPe. Ces substances pourraient donc être incluses dans ACV4E.

Groupes 4 et 5 : L'absence totale de FC dans le premier cas et l'absence de rendements épuratoires dans le second cas ne permettent pas d'évaluer ces substances dans nos ACV.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Synthèse de l'analyse des substances étudiées

Groupes	Nombre de substances	Analyse par familles de substances				
		Pesticides	HAP	COV	ETM	Autres composés organiques
1	12				12	
2a	1	1				
2b	1					1
3	7				1	6
4	6				5	1
5	85	31	9	7	7	31
TOTAL	112	32	9	7	25	39

Les substances qui peuvent directement être prises en compte dans ACV4E (groupe 1) sont uniquement des ETM. Sur ces 12 ETM, 4 sont déjà inclus dans le logiciel. Parmi les 9 autres substances qui pourraient être incluses après une conversion des FC de USEtox en FC de ReCiPe, on compte 7 « autres composés organiques », 1 pesticide (diuron) et 1 ETM (chrome hexavalent). Au final ce sont 21 substances sur 112 qui peuvent être incluses dans ACV4E, soit 19 % des substances.

Les HAP et les COV ne seront pas du tout représentés dans ACV4E pour le moment.

5. Intégration de nouvelles substances dans le logiciel ACV4E

5.1. Méthodologie

Un des objectifs de l'outil ACV4E est d'équilibrer le bilan matière des polluants contenus dans les eaux usées :

- **Polluants azotés** (NH_4^+ , NO_3^- , N_2O , etc.), **phosphorés** (PO_4^{3-} , P_2O_5 , etc.) et **carbonés** (CO_2 , CH_4 , etc.). Pour ceux-ci le bilan se fait sur les éléments azote, phosphore et carbone, et non sur les molécules.
- **Micropolluants**. Pour ceux-ci le bilan se fait sur les molécules car généralement ils contiennent plusieurs éléments (sauf les métaux).

Le principe du bilan matière est le suivant : la quantité entrante de chaque polluant doit se retrouver intégralement en sortie dans un ou plusieurs des compartiments suivants :

- **Emissions directes dans l'air, le sol ou l'eau**. Au vu des traitements étudiés les émissions directes dans le sol sont anecdotiques (voire accidentelles) et seront donc négligées³.
- **Emissions dans des sous-produits de l'activité d'épuration** : boues, filtres (sable, charbon), végétaux, etc.
- **Pour les micropolluants uniquement : (bio)dégradation possible**. Par manque de données et par souci de simplicité nous ne nous intéresserons pas aux produits de dégradation de ces polluants.

Dans ACV4E, les émissions qui n'engendrent aucun impact environnemental ont été regroupées dans une même catégorie « Autres ». Cela concerne les émissions dans des filtres, des végétaux ou tout autre support en contact avec les eaux à traiter⁴. La part des micropolluants qui sont dégradés est aussi incluse dans cette catégorie.

Dans le projet AMPERES, les rendements épuratoires de la filière eau (notés R2) permettent de connaître les flux de micropolluants rejetés dans l'eau, mais ne permettent pas de connaître le devenir des micropolluants retirés de l'eau : ceux-ci peuvent être transférés dans les boues (par piégeage dans les MES ou par adsorption), dégradés/convertis ou volatilisés. C'est pourquoi un rendement global (noté R4) a aussi été défini, permettant « pour une substance, d'évaluer l'importance des processus de transformation (dégradation/conversion) ou d'évaluer si celle-ci est simplement stockée dans les boues » (Choubert, 2011). Plus R4 est grand plus la substance est transformée et donc moins accumulée dans les boues.

³ Les eaux usées ne sont jamais en contact avec le sol dans le cas des stations à boues activées. Concernant les filtres plantés de roseaux et les lagunages, les surfaces doivent être imperméabilisées, empêchant ainsi le transfert des polluants dans le sol.

⁴ Actuellement aucune fin de vie n'est définie pour ces éléments donc le devenir des polluants qui s'y trouvent est inconnu.

Toujours dans le projet AMPERES, les rendements épuratoires ont été classés en trois catégories : inférieurs à 30 %, entre 30 % et 70 %, supérieurs à 70 %.

Lorsque ceux-ci seront disponibles, les rendements épuratoires R2 précis seront utilisés pour calculer les **émissions de micropolluants dans l'eau** dans le bilan matière ACV4E. Dans le cas où seule la classe de rendement est connue, nous utiliserons la moyenne de cette classe (soit 15 %, 50 % ou 85 %).

Lorsque ceux-ci seront disponibles, nous nous baserons sur les rendements R4 pour évaluer les **émissions dans les boues et l'air**. En pratique ces rendements ne sont connus que pour les filières à boues activées, et seules les classes de rendements sont disponibles. Nous choisissons d'appliquer les règles arbitraires suivantes :

- Pour les micropolluants hors ETM :

Tableau 4. Règles de répartition des micropolluants hors métaux

Classes de rendement R4	Moyennes des classes (%)	Emissions AIR ou AUTRES (%)*	Emissions BOUES (%)	Emissions SOL (%)
R4 < 30 %	15	0,15*R2	0,85*R2	Négligées
30 ≤ R4 ≤ 70 %	50	0,50*R2	0,50*R2	Négligées
R4 > 70 %	85	0,85*R2	0,15*R2	Négligées

* La répartition entre les compartiments « air » et « autres » se fera au cas par cas selon la substance étudiée.

- Pour les ETM :

Les données disponibles sur les stations à boues activées montrent que tous les rendements R4 sont inférieurs à 30 %, sauf pour le mercure où R4 est supérieur à 70 %. Nous admettons que les ETM ne sont pas dégradables/transformables contrairement aux autres micropolluants, et qu'ils ne sont pas volatils sauf le mercure. Cela étant dit, nous faisons donc l'hypothèse que les ETM retirés de l'eau sont totalement transférés aux boues (soit R4=0 %) sauf le mercure. Le mercure étant volatil, il est soumis aux règles de répartition définies dans le Tableau 4. L'article de Besnault et al. (2015) confirme que les procédés de traitement des boues ne permettent pas d'éliminer les métaux.

Les classes de rendements R4 ne sont pas disponibles pour les traitements par FPR et lagunage, donc la répartition des micropolluants se fera au cas par cas, selon la substance.

Le Tableau 5 montre un exemple de bilan matière obtenu pour une filière à boues activées en aération prolongée sans traitement tertiaire, pour les 12 ETM pouvant être directement inclus dans ACV4E.

Remarques :

- Le cadmium, le mercure, le nickel et le plomb étaient déjà pris en compte dans le logiciel mais leur répartition dans les différents compartiments a changé.
- Les autres bilans matière et les hypothèses qui ont servi à leur construction seront disponibles dans un document spécifique.
- Les facteurs de caractérisation pour les 12 ETM concernés sont disponibles en annexe 9.3.

Tableau 5. Bilan matière d'une filière à boues activées en aération prolongée sans traitement tertiaire, pour les 13 métaux retenus dans l'étude.

Catégorie	Nom substance	R2 (%)	R4 (%)	ENTREE (g/(j*EH))	SORTIE (%)					
					Emissions et rejets directs			Emissions dans des sous-produits		TOTAL SORTIE
					AIR	SOL	EAU	Boues	Autres	
ETM	Cadmium	65		3,6E-05	0		35	65	0	100
	Mercuré	91		7,2E-05	77		9	14	0	100
	Nickel	57		1,9E-03	0		43	57	0	100
	Plomb	73		1,2E-03	0		27	73	0	100
	Cobalt	16		1,2E-04	0		84	16	0	100
	Arsenic	28		4,7E-04	0		72	28	0	100
	Molybdène	37		8,8E-04	0		63	37	0	100
	Zinc	57		2,5E-02	0		43	57	0	100
	Baryum	65		1,0E-02	0		35	65	0	100
	Cuivre	83		9,7E-03	0		17	83	0	100
	Chrome	85		2,0E-03	0		15	85	0	100
	Vanadium	0	-	3,2E-04	0		100	0	0	100

R2 : rendement filière eau		R < 30 %
R4 : rendement global		30 ≤ R ≤ 70 %
		R > 70 %
	-	Valeur non calculable

Par ailleurs, toujours dans le projet AMPERES, le suivi des substances chimiques est réalisé sur leur fraction totale, c'est-à-dire la somme des fractions dissoute et particulaire. Or dans les méthodes d'impacts actuelles en ACV (par exemple ReCiPe ou USEtox), les substances listées dans les inventaires peuvent être émises sous plusieurs formes et redistribuées⁵ différemment suivant leur forme par un modèle de répartition entre les compartiments environnementaux eau/air/sol.

Ainsi, pour les métaux notamment, il n'existe en ACV que des facteurs de caractérisation pour une certaine forme dissoute ionique. Pour ceux-ci, en multipliant les quantités mesurées dans les effluents de station par leurs facteurs de caractérisation, les praticants de l'ACV font généralement (et souvent implicitement sans le savoir) l'hypothèse que toute la fraction métallique mesurée est ionique, ce qui conduit à surestimer les impacts.

Un consensus a été atteint avec le Clearwater consensus (Diamond, 2010), pour mieux quantifier les impacts en écotoxicité d'eau douce notamment pour les métaux non ferriques. Dans ce cadre, pour mieux représenter l'impact d'une substance métallique, la fraction dissoute vraie est déterminée en appliquant un facteur de correction appelé facteur de biodisponibilité, à la fraction totale dissoute qui est mesurée (Figure 1).

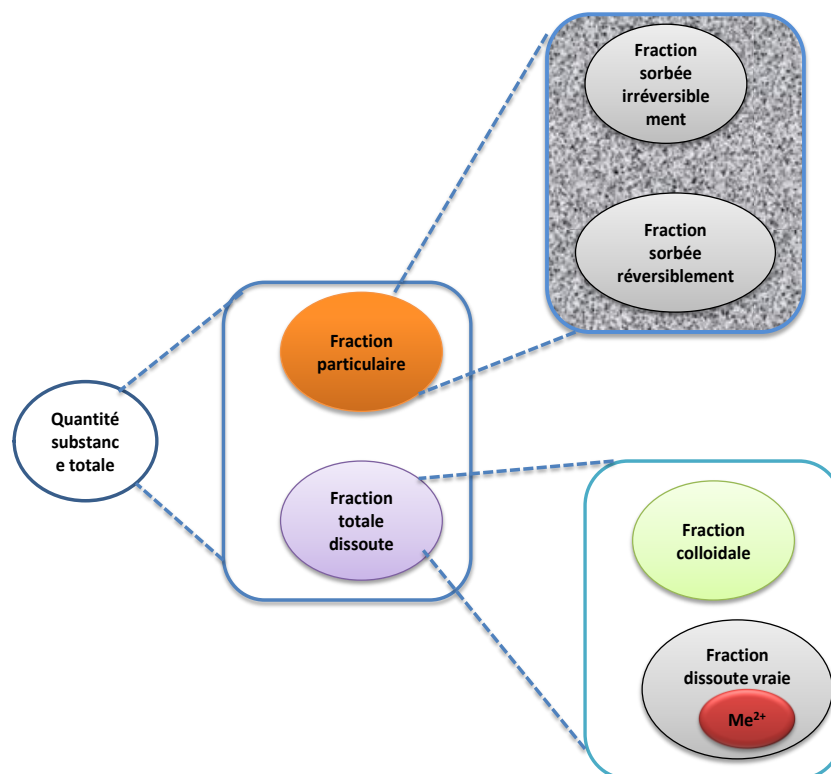


Figure 1. Différentes fractions d'une substance chimique (adapté de Diamond et al, 2010)

⁵ Cette redistribution est réalisée au travers des facteurs de caractérisation (le facteur de « devenir » intégré dans les facteurs de caractérisation).

Pour les métaux, la fraction dissoute vraie qui est supposée biodisponible, est contenue dans la fraction totale dissoute. Ensuite, la fraction de l'ion métallique libre (ex : Me^{2+}) est elle-même contenue dans la fraction dissoute vraie.

Il conviendra de décider comment gérer cette question dans le logiciel ACV4E.

5.2. Influence sur les résultats d'ACV

Ce paragraphe a pour objectif de tester l'influence de l'introduction de nouveaux micropolluants dans les ACV des stations d'épuration. Tous les résultats présentés par la suite tiennent compte des impacts des micropolluants émis dans le sol via l'épandage des boues d'épuration, ce qui n'est pas le cas dans la version actuelle du logiciel ACV4E (amélioration à venir).

Nous avons dans un premier temps comparé deux modèles de la même STEP :

- **Modèle A1** : boues activées en aération prolongée (5200 EH) avec prise en compte de 7 micropolluants (situation actuelle dans ACV4E).
- **Modèle A2** : modèle A1 en élargissant la liste à 15 micropolluants (inclusion des 8 nouveaux ETM identifiés dans la présente étude).

La composition des rejets de STEP en micropolluants pour les deux modèles est disponible en annexe 9.4.

La Figure 2 présente la comparaison des deux modèles étudiés. L'élargissement de la liste des micropolluants augmente les impacts d'écotoxicité, mais augmente surtout la toxicité humaine d'un facteur de 2,3. Cette augmentation est encore plus marquée pour les filtres plantés de roseaux (voir annexe 9.5).

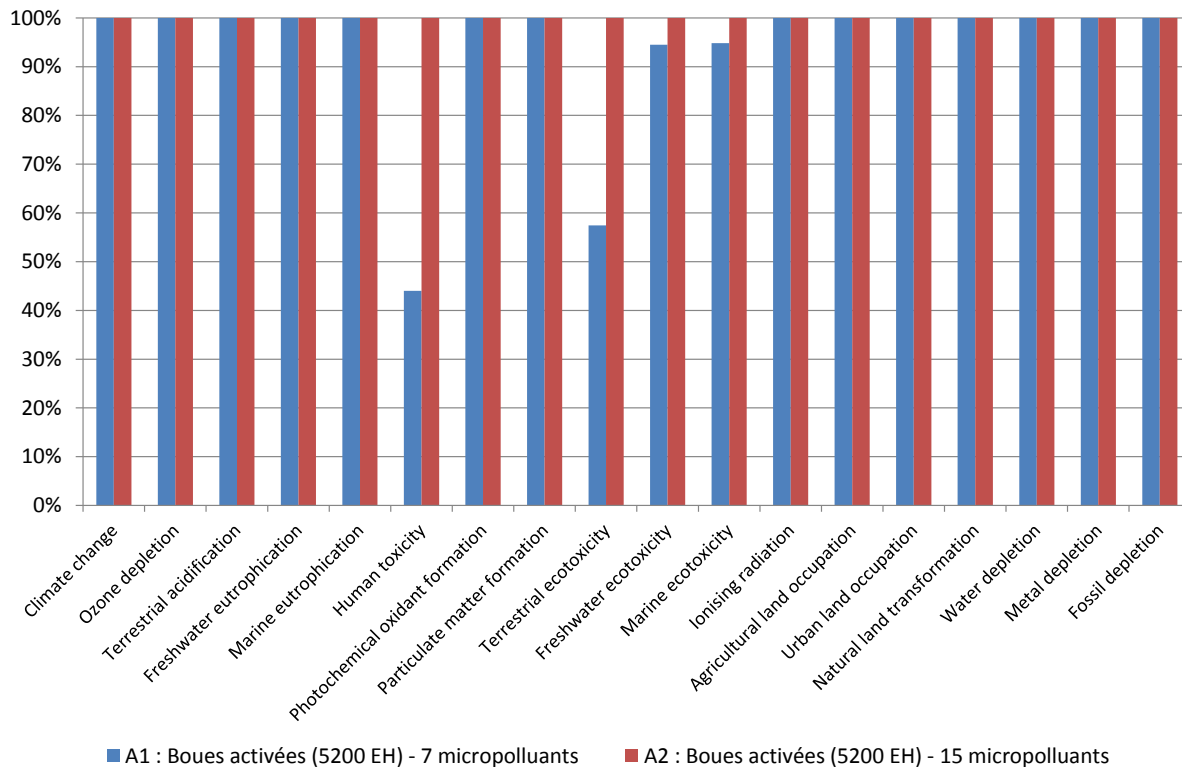


Figure 2. Influence de la prise en compte de nouveaux micropolluants sur les résultats d'ACV pour une station à boues activées (méthode ReCiPe Midpoint (H) V1.11)

Pour les quatre catégories d'impacts concernées, la Figure 3 montre l'évolution des contributions aux impacts lorsque l'on augmente le nombre de substances étudiées. Les contributions des rejets et émissions qui étaient quasiment nulles (entre 0 % et 0,8 %) représentent maintenant entre 3 % et 45 % des impacts selon la catégorie. De plus, la part de la fin de vie des boues augmente sensiblement pour l'écotoxicité terrestre (de 6 % à 43 %).

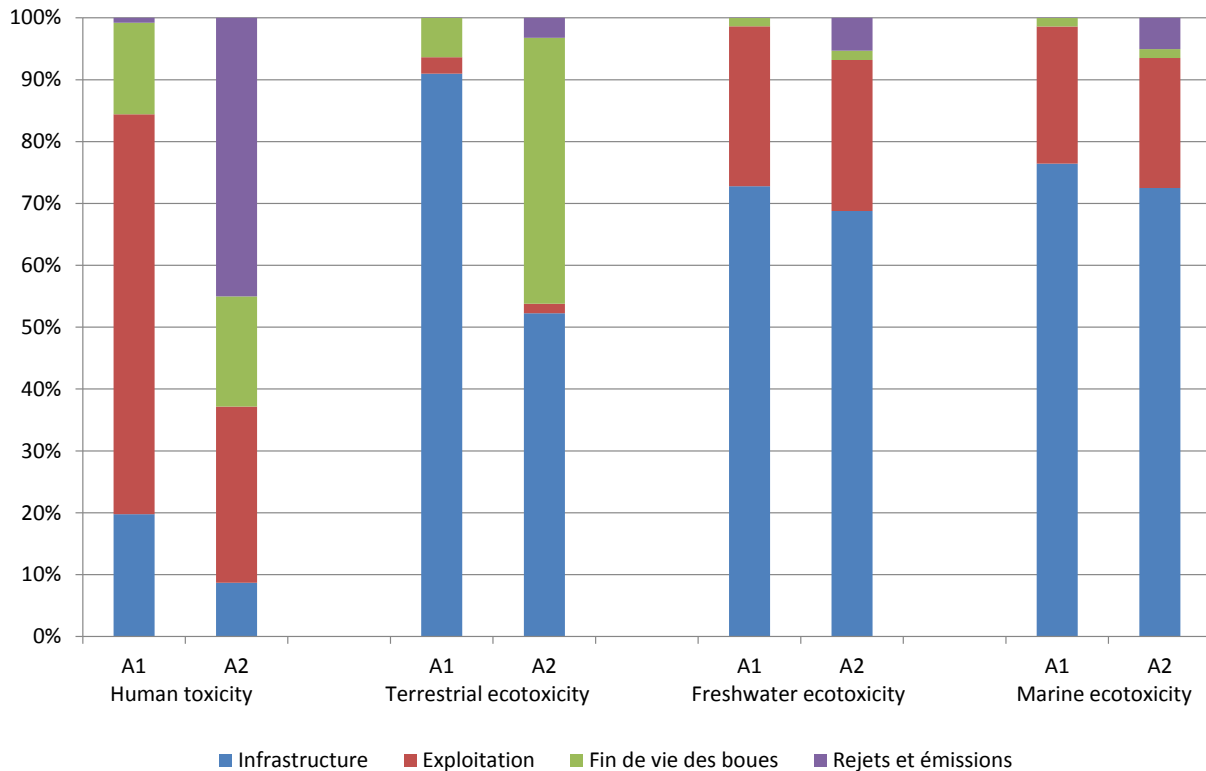


Figure 3. Influence de la prise en compte de nouveaux micropolluants sur les contributions aux impacts d'ACV pour une station à boues activées (méthode ReCiPe Midpoint (H) V1.11).

Par ailleurs nous avons évalué les **performances environnementales d'un traitement tertiaire** avec l'exemple d'une filtration sur sable et sur charbon actif à la suite d'un traitement à boues activées en aération prolongée (voir la Figure 4).

On peut ainsi comparer 4 modèles :

- **Modèle A1** : boues activées en aération prolongée (5200 EH) avec prise en compte de 7 micropolluants (situation actuelle dans ACV4E).
- **Modèle A2** : modèle A1 en élargissant la liste à 15 micropolluants (inclusion des 8 nouveaux ETM identifiés dans la présente étude).
- **Modèle B1** : modèle A1 avec traitement tertiaire (filtres sable et charbon actif)
- **Modèle B2** : modèle A2 avec traitement tertiaire (filtres sable et charbon actif)

La composition des rejets de STEP en micropolluants pour les quatre modèles est disponible en annexe 9.4.

En prenant en compte seulement 7 micropolluants, l'ajout d'un traitement tertiaire est plutôt désavantageux à cause des impacts liés à l'infrastructure et à la mise en œuvre du procédé qui ne sont pas compensés par un gain au niveau de la qualité des rejets. En incluant plus de substances l'écart se réduit, donc a priori plus il y aura de substances étudiées plus l'ajout d'un traitement tertiaire deviendra avantageux d'un point de vue environnemental.

En revanche, si d'un point de vue environnemental global l'ajout d'un traitement tertiaire est neutre (ce que l'on peut considérer avec 15 substances (A2, B2) car les incertitudes sur les résultats sont importantes), le bénéfice environnemental local (qualité des écosystèmes locaux) peut potentiellement être très important.

Remarque : ces résultats ne tiennent pas compte de la fin de vie des matériaux filtrants qui sont potentiellement sources de réémissions dans l'environnement.

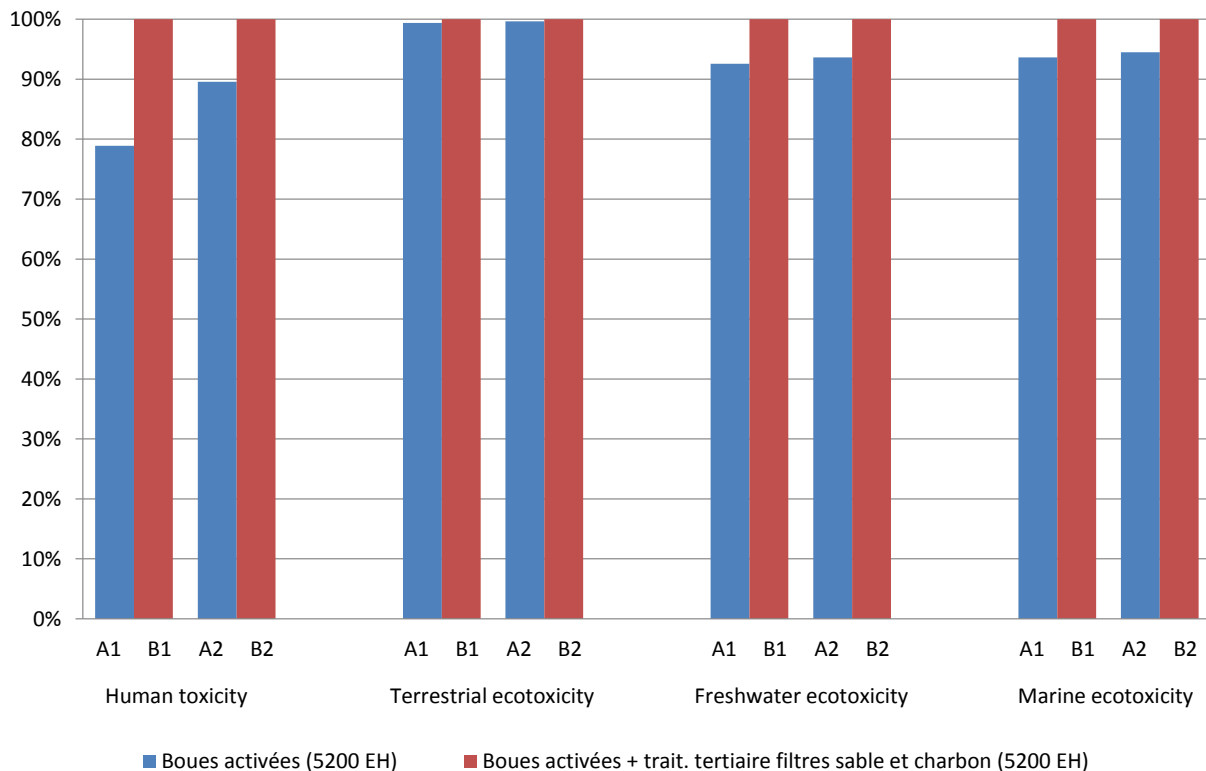


Figure 4. Influence de la prise en compte de nouveaux micropolluants sur les impacts environnementaux d'un traitement tertiaire pour une station à boues activées (méthode ReCiPe Midpoint (H) V1.11).

6. Prise en compte en ACV des pathogènes contenus dans l'eau

Les impacts potentiels des organismes pathogènes sur la santé humaine n'étaient jusqu'à récemment pas encore inclus dans les méthodes d'ACV, en raison de verrous méthodologiques. Des recherches sont en cours, et une étude récente a réussi à quantifier le risque associé aux pathogènes dans le cadre de l'ACV d'une station d'épuration (Harder et al., 2014) : il s'étend de 0,2 à 9 DALY⁶/an (min, max) pour 28 600 personnes connectées. Cette même étude a montré **l'importance de ce risque relativement aux autres impacts sur la santé humaine** (jusqu'à 20 % des impacts potentiels totaux sur la santé humaine) (Heimersson et al., 2014).

Les résultats de cette étude ne sont pas directement extrapolables dans ACV4E pour deux raisons : l'étude ne fournit pas de facteurs de caractérisation à multiplier ensuite par des flux de pathogènes, mais fournit directement des impacts, lesquels sont spécifiques à la filière de traitement et aux pathogènes étudiés. Dans l'étude, le périmètre du système est différent de celui d'ACV4E : les impacts sur site (liés à l'exposition des personnes) sont pris en compte alors que dans ACV4E (et en ACV en général), seuls les impacts liés au devenir des substances dans l'environnement sont pris en compte.

Dans la mesure où ces valeurs sont actuellement les seules disponibles pour pouvoir estimer les dommages liés aux pathogènes, nous proposons de les utiliser pour le logiciel ACV4E.

Proposition pour le logiciel ACV4E :

Pour ACV4E, nous envisageons d'adopter comme valeur de dommage le **risque moyen calculé dans l'étude** et que dans un premier temps cette **valeur soit identique à toutes les filières de traitement disponibles dans ACV4E**. Dans un second temps, elle pourra être différenciée suivant les filières (boues activées, filtres plantés de roseaux, lagunage etc.) si des différences concernant les risques d'exposition et les abattements sont mises en évidence et quantifiées.

L'implémentation du risque lié aux pathogènes fera l'objet d'un rapport à part entière.

⁶ Disability-adjusted life years : nombre d'années de vie perdues et nombre d'années de vie vécues avec un handicap. C'est une unité retenue en ACV pour quantifier les impacts potentiels sur la santé humaine.

7. Conclusion

Ce rapport d'étape dresse un premier bilan des possibilités et des limites concernant la prise en compte des micropolluants dans les ACV de stations d'épuration. 8 ETM seront ajoutés à la liste des micropolluants évalués dans ACV4E, liste qui s'agrandira à l'avenir en fonction de l'évolution des méthodes d'impacts et de l'acquisition de nouvelles données sur les efficacités épuratoires des stations d'épuration. Cela va ainsi permettre d'améliorer la qualité des résultats d'ACV mais aussi de pouvoir comparer des systèmes incluant des traitements tertiaires, en quantifiant non seulement la charge environnementale supplémentaire liée à ces traitements mais aussi les bénéfices en termes de pollution évitée (qui étaient très sous-estimés jusque-là). Ce travail est à poursuivre en 2015 en relation avec la modélisation de procédés de traitement complémentaires (membranes, filtre à charbon actif, etc.). Concernant les pathogènes, une première estimation de leur impact potentiel sur la santé humaine dans le cadre de l'ACV est disponible et sera implémentée à terme dans le logiciel ACV4E.

8. Références

- AESN, 2014. Base de données qualité des eaux de l'agence de l'eau Seine-Normandie. <http://www.eau-seine-normandie.fr/index.php?id=1629> (accessed 7.1.14).
- Besnault, S., Choubert, J-M., Miège, C., Martin-Ruel, S., Noyon, N., Esperanza, M., Budzinski, H., Le Menach, K., Dherret, L., Bados, P., Coquery, M., 2015. Devenir des micropolluants adsorbables à travers les procédés de traitement de boues – Techniques Sciences et Méthodes n° 3 de 2015, p. 84-102.
- Choubert, J-M., Martin-Ruel, S., Budzinski, H., Miège, C., Esperanza, M., Soulier, C., Lagarrigue, C., Coquery, M., 2011. Evaluer les rendements des stations d'épuration : Apports méthodologiques et résultats pour les micropolluants en filières conventionnelles et avancées – Techniques Sciences et Méthodes n° ½ de 2011, p. 44-62.
- Communauté Européenne, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau – Journal Officiel n° L 327 du 22 décembre 2000, p. 1-73.
- Communauté Européenne, 2013. Directive 2013/39/UE du Parlement européen et du Conseil du 12 août 2013 modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau – Journal Officiel n° L 226 du 24 août 2013, p. 1-17.
- Diamond, M., Gandhi, N., Adams, W., 2010. The Clearwater consensus: the estimation of metal hazard in fresh water – International Journal Life Cycle Assessment, 15, p.143-147.
- Doka, G., 2009. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services – Ecoinvent report No. 13. Part IV. Dübendorf.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. De, Struijs, J., Zelm, R. Van, 2009. ReCiPe 2008 Report I: Characterisation
- Harder, R., Heimersson, S., Svanström, M., Peters, G., 2014. Including pathogen risk in life cycle assessment of wastewater management. 1. Estimating the burden of disease associated with pathogens – Environmental Science and Technology, 48, p9438-p9445.
- Heimersson, S., Harder, R., Peters, G., Svanström, M., 2014. Including pathogen risk in life cycle assessment of wastewater management. 2. Quantitative comparison of pathogen risk to other impacts on human health – Environmental Science and Technology, 48, p9446-p9453.
- Loubet, P., 2014. Assessing the environmental impacts of a complex urban water system ased on the life cycle assessment framework, Development of a versatile model and advanced water deprivation indicators – Thèse de doctorat – Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques.

Ministère de l'écologie et du développement durable, 2005. Circulaire DCE 2005/12 relative à la définition du "bon état" et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface.

Ministère de l'écologie et du développement durable, 2010. Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement.

ONEMA, 2010. Bilan 2008 de l'assainissement en France.

Rosenbaum RK, Bachmann TM, Gold LS, Huijbregts MAJ, Jolliet O, Juraske R, Köhler A, Larsen HF, MacLeod M, Margni M, McKone TE, Payet J, Schuhmacher M, van de Meent D, Hauschild MZ, 2008. USEtox – The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. Int J Life

SEDIF, 2012. Rapport annuel. <http://www.sedif.com/Publications-institutionnelles>

SIAAP, 2012. Les usines du Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne. www.siaap.fr/nos-equipements/les-usines

9. Annexes

9.1. Explications relatives au Tableau 1

Rappel : La DCE définit deux concepts : l'état écologique et l'état chimique des eaux de surface. L'état écologique est déterminé à partir de paramètres biologiques, physico-chimiques (pH, DBO₅, nutriments, etc.) et chimiques (polluants spécifiques), et comporte 5 classes (très bon, bon, moyen, médiocre, mauvais). L'état chimique est évalué par les concentrations en polluants dits prioritaires, plus dangereux que ceux évalués dans l'état écologique, et comporte 2 classes (bon, mauvais).

Le Tableau 1 est issu de la thèse de P. Loubet dont l'un des objectifs était de développer un indicateur de qualité d'eau unique regroupant les impacts potentiels d'eutrophisation et d'écotoxicité dans le cadre de l'ACV. Afin de tester cet indicateur sur différentes qualités d'eau, P. Loubet a fait le choix de fusionner les concepts d'état écologique et d'état chimique pour obtenir des qualités de référence incluant à la fois des nutriments et des micropolluants. Cela revient à répartir les micropolluants dans les classes de l'état écologique en définissant des concentrations pour chaque classe. La méthode choisie fut la suivante : les concentrations pour les classes « moderate » et « poor » sont égales au seuil entre le bon et le mauvais état chimique⁷, et les concentrations pour les classes « very good » et « good » sont égales à la moitié de ce seuil. Cette méthode concerne donc uniquement les valeurs dans les cases en bleu dans le tableau. Les paramètres physico-chimiques (cases en vert) ne sont pas concernés puisqu'ils sont déjà définis dans l'état écologique.

⁷ Source : Ministère de l'écologie et du développement durable, 2010. Sauf pour l'élément « Aluminium » pour lequel la source est : Ministère de l'écologie et du développement durable, 2005.

9.2. Analyse des substances suivies par la DCE

Légende des Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8, Tableau 9, Tableau 10 :

0 : donnée absente ; **1** : donnée disponible

CF : facteur de caractérisation

Activated sludge : boues activées

VFCW : filtres plantés de roseaux à écoulement vertical

Primary settling + ponds : décantation primaire + lagunage

Le **code couleur** figurant dans la colonne « STATUS » est explicité dans le Tableau 2.

* : Substances prioritaires dangereuses

Tableau 6. Analyse des substances prioritaires de la DCE au regard des méthodes d'impacts USEtox et ReCiPe et du projet AMPERES (1/5)

N°	Priority substances (Annex 1 WFD, Directive 2013/39/EU)		USEtox		ReCiPe		AMPERES			STATUS
			CF WATER	CF SOIL	CF WATER	CF SOIL	Activated sludge	VFCW	Primary settling + Ponds	
1	15972608	Alachlor	1	1	1	1	0	0	0	Red
2	120127	Anthracene*	1	1	1	1	0	0	0	
3	1912249	Atrazine	1	1	0	1	1	1	0	
4	71432	Benzene	1	1	1	1	0	0	0	
5	Brominated diphenylethers									
	5a	40088479 Tetrabromodiphenylether*	0	0	0	0	1	0	0	Red
	5b	32534819 Pentabromodiphenylether*	0	0	0	0	1	1	0	
	5c	36483600 Hexabromodiphenylether*	0	0	0	0	0	0	0	
	5d	68928803 Heptabromodiphenylether*	0	0	0	0	0	0	0	
6	7440439	Cadmium & compounds*	1	1	1	1	1	1	1	Green
7	85535848	Chloroalkanes, C10-13*	0	0	0	0	1	0	0	
8	470906	Chlorfenvinphos	1	1	1	1	0	0	0	Red
9	2921882	Chlorpyrifos	1	1	0	1	1	0	0	
10	107062	1,2-dichloroethane	1	1	1	1	0	0	0	
11	75092	Dichloromethane	1	1	1	1	1	0	0	
12	117817	Di(2-éthylhexyl)phthalate (DEHP)	1	1	1	0	1	1	1	Green
13	330541	Diuron	1	1	0	1	1	1	1	
14	115297	Endosulfan*	1	1	0	1	0	0	0	Red
15	206440	Fluoranthene	1	1	1	1	1	0	0	
16	118741	Hexachlorobenzene*	1	1	0	0	0	0	0	
17	87683	Hexachlorobutadiene*	1	1	0	0	0	0	0	
18	608731	Hexachlorocyclohexane*	1	1	0	0	0	1	0	Red
19	34123596	Isoproturon	1	1	0	1	1	0	0	
20	7439921	Lead & compounds	1	1	1	1	1	1	1	
21	7439976	Mercury & compounds*	1	1	1	1	1	1	1	
22	91203	Naphtalene	1	1	1	1	0	0	0	Red
23	7440020	Nickel & compounds	1	1	1	1	1	1	1	
24	Nonylphenols isomers									
	24a	25154523 Nonylphenol*	1	1	0	0				Yellow
	24b	104405 4-nonylphenol (P-nonylphenol)*	1	1	0	0	1	1	1	
	24c	84852153 4-nonylphenol (N-nonylphenol)*	1	1	0	0				
25	Octylphenols isomers									
	25a	1806264 Octylphenol	0	0	0	0	0	0	0	Red
	25b	140669 4-tert-octylphenol	1	1	0	0	1	1	1	

Tableau 7. Analyse des substances prioritaires de la DCE au regard des méthodes d'impacts USEtox et ReCiPe et du projet AMPERES (2/5)

N°	Priority substances (Annex 1 WFD, Directive 2013/39/EU)		USEtox		ReCiPe		AMPERES			STATUS
			CF WATER	CF SOIL	CF WATER	CF SOIL	Activated sludge	VFCW	Primary settling + Ponds	
26	608935	Pentachlorobenzene*	1	1	0	0	0	0	0	
27	87865	Pentachlorophenol	1	1	0	0	0	0	0	
28	Polyaromatic hydrocarbons (PAH)									
28a	50328	Benzo(a)pyrene*	1	1	0	0	0	0	0	
28b	205992	Benzo(b)fluoranthene*	0	0	0	0	1	0	0	
28c	191242	Benzo(g,h,i)perylene*	0	0	0	0	0	0	0	
28d	207089	Benzo(k)fluoranthene*	0	0	0	0	1	0	0	
28e	193395	Indeno(1,2,3-cd)pyrene*	0	0	0	0	1	0	0	
29	122349	Simazine	1	1	0	1	1	1	0	
30	36643284	Tributyltin-cation*	0	0	1	0	0	1	0	
31	12002481	Trichlorobenzenes	1	1	1	1	1	1	0	
32	67663	Trichloromethane/chloroform	1	1	1	1	1	1	0	
33	1582098	Trifluralin*	1	1	0	1	0	0	0	
34	115322	Dicofol*	1	1	0	1	0	0	0	
35	1763231	Perfluorooctanesulfonic acid*	0	0	0	0	0	0	0	
36	124495187	Quinoxifen*	0	0	0	0	0	0	0	
37	-	Dioxins and compounds type dioxin*	-	-	-	-	0	0	0	
38	74070465	Aclonifen	1	1	1	1	0	0	0	
39	42576023	Bifénox	1	1	1	1	0	0	0	
40	28159980	Cybutryne (Irgarol)	1	1	1	1	0	0	0	
41	52315078	Cypermethrin	1	1	1	1	0	0	0	
42	62737	Dichlorvos	1	1	1	1	0	0	0	
43	Hexabromocyclododecane (HBCDD)									
43a	25637994	1,3,5,7,9,11-hexabromocyclododecane*	1	1	1	1	0	0	0	
43b	3194556	1,2,5,6,9,10-hexabromocyclododecane*	0	0	0	0	0	0	0	
43c	134237506	alpha-hexabromocyclododecane*	0	0	0	0	0	0	0	
43d	134237517	beta-hexabromocyclododecane*	0	0	0	0	0	0	0	
43e	134237528	gamma-hexabromocyclododecane*	0	0	0	0	0	0	0	
44	76448	Heptachlor*	1	1	1	1	0	0	0	
	1024573	Heptachlor epoxide*	1	1	1	1	0	0	0	
45	886500	Terbutryn	1	1	1	1	0	0	0	

Tableau 8. Analyse des substances prioritaires de la DCE au regard des méthodes d'impacts USEtox et ReCiPe et du projet AMPERES (3/5)

Other regulated substances			USEtox		ReCiPe		AMPERES			STATUS
			CF WATER	CF SOIL	CF WATER	CF SOIL	Activated sludge	VFCW	Primary settling + Ponds	
N°	CAS N°	Name								
6bis	56235	Carbon tetrachloride	1	1	1	1	0	0	0	Red background
9bis	309002	Aldrin	1	1	1	1	0	0	0	
9bis	60571	Dieldrin	1	1	1	1	0	0	0	
9bis	72208	Endrin	1	1	1	1	0	0	0	
9bis	465736	Isodrin	1	1	1	1	0	0	0	
9ter	-	Total DDT	-	-	-	-	0	0	0	
9ter	50293	Para-para-DDT	1	1	1	1	0	0	0	
29bis	127184	Tetrachloroethylene	1	1	1	1	1	0	0	
29ter	79016	Trichloro-éthylène	1	1	1	1	1	0	0	

Tableau 9. Analyse des substances prioritaires de la DCE au regard des méthodes d'impacts USEtox et ReCiPe et du projet AMPERES (4/5)

N°	CAS N°	Name	USEtox		ReCiPe		AMPERES			STATUS	
			CF WATER	CF SOIL	CF WATER	CF SOIL	Activated sludge	VFCW	Primary settling + Ponds		
		- Mono-chlorophenols	-	-	-	-	1	0	0	Red	
	25167811	Dichlorophenols	1	1	1	1	1	1	0		
	80057	Bisphenol A	1	1	1	1	1	0	0		
	1163195	Decabromodiphenyl ether	1	1	1	1	1	0	0		
	95169	Benzothiazole	1	1	0	0	1	1	1		Yellow
	126738	Tributyl phosphate	1	1	1	1	1	0	0		Orange
	104358	4-NP1EO	0	0	0	0	1	1	1		
	98544	4-tert-butylphenol	1	1	0	0	1	1	1		Yellow
	3380345	Triclosan	1	1	1	1	1	1	0		Red
	49690940	Tribromodiphenyl ether	0	0	0	0	1	0	0		
	1071836	Glyphosate	1	1	1	1	1	1	0		
	1066519	AMPA	0	0	0	0	1	1	0		
	32536520	Octabromodiphenyl ether	0	0	1	1	0	0	0		
	25167822	Trichlorophenols	1	1	1	1	0	0	0		
	25167833	Tetrachlorophenol	1	1	1	1	0	0	0		
	95567	2-bromophenol	1	1	1	1	0	0	0		
	615587	2,4-dibromophenol	0	0	0	0	0	0	0		
	118796	2,4,6-tribromophenol	1	1	1	1	0	0	0		
	78763549	Monobutyltin	0	0	0	0	0	1	1		
	818086	Dibutyltin	1	1	1	1	0	1	1		
	20427843	4-NP2EO	0	0	0	0	0	1	1		
	3115499	4-NP1EC	0	0	0	0	0	1	1		

Tableau 10. Analyse des substances prioritaires de la DCE au regard des méthodes d'impacts USEtox et ReCiPe et du projet AMPERES (5/5)

Other metals			USEtox		ReCiPe		AMPERES			STATUS
			CF WATER	CF SOIL	CF WATER	CF SOIL	Activated sludge	VFCW	Primary settling + Ponds	
N°	CAS N°	Name								
	7440360	Antimony	1	1	1	1	1	1	0	
	7440428	Boron	0	0	0	0	1	1	1	
	7440177	Rubidium	0	0	0	0	1	1	1	
	7440484	Cobalt	0	0	1	1	1	1	1	
	7440382	Arsenic	1	1	1	1	1	1	1	
	7439987	Molybdenum	1	1	1	1	1	1	1	
	7440666	Zinc	1	1	1	1	1	1	1	
	7440393	Barium	1	1	1	1	1	1	1	
	7782492	Selenium	1	0	1	1	1	0	0	
	7440611	Uranium	0	0	0	0	1	1	0	
	7440326	Titanium	0	0	0	0	1	1	1	
	7439896	Iron	0	0	0	0	1	1	1	
	7440508	Copper	1	1	1	1	1	1	1	
	7440473	Chromium	1	1	1	1	1	1	1	
	18540299	Chromium VI (hexavalent chromuim)	1	1	0	0	1	1	1	
	7440315	Tin	1	0	1	1	1	1	0	
	7429905	Aluminium	0	0	0	0	1	1	1	
	7440224	Silver	1	1	1	1	1	1	0	
	7440622	Vanadium	1	1	1	1	1	1	1	
	7439932	Lithium	0	0	0	0	0	0	0	
	7440280	Thallium	1	1	1	1	0	0	0	

9.3. Facteurs de caractérisation pour les 12 ETM retenus à l'issue de l'étude

Tableau 11. Facteurs de caractérisation pour les 12 ETM - Compartiment AIR

Compartiment AIR			Impacts (mid-point)					Dommages (end-point)			
			FC midpoint	Toxicité humaine	Ecotoxicité terrestre	Ecotoxicité eau douce	Ecotoxicité marine	FC endpoint	Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources naturelles
Catégorie	Nom substance	Désignation	Unité -->	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	Unité -->	DALY / g	species.yr / g	\$/ g
ETM	Cadmium	Cd	1	3,6E+01	1,1E-02	4,7E-04	2,8E-02	1	2,5E-05	1,7E-09	
	Mercuré	Hg	1	5,2E+02	1,0E-01	3,3E-03	5,9E-01	1	3,6E-04	1,6E-08	
	Nickel	Ni	1	4,4E-01	5,1E-03	2,9E-03	8,8E-02	1	3,1E-07	7,9E-10	
	Plomb	Pb	1	1,6E+01	7,1E-05	4,8E-06	1,6E-03	1	1,1E-05	1,1E-11	
	Cobalt	Co	1	4,3E+00	1,1E-02	5,9E-03	2,5E-02	1	3,0E-06	1,7E-09	
	Arsenic	As	1	5,1E+01	1,4E-04	2,0E-04	1,6E-02	1	3,6E-05	2,5E-11	
	Molybdène	Mo	1	1,6E+00	2,3E-05	3,7E-05	8,0E-04	1	1,1E-06	3,7E-12	
	Zinc	Zn	1	5,1E-01	3,6E-03	2,2E-04	2,2E-02	1	3,5E-07	5,4E-10	
	Baryum	Ba	1	6,9E-01	4,4E-04	3,6E-04	1,4E-03	1	4,8E-07	6,6E-11	
	Cuivre	Cu	1	1,7E-02	3,3E-02	4,3E-03	2,7E-01	1	1,2E-08	5,0E-09	
	Chrome	Cr	1	3,1E-04	6,9E-05	1,0E-05	3,2E-03	1	2,2E-10	1,1E-11	
	Vanadium	V	1	3,5E+00	6,2E-03	3,6E-03	7,2E-02	1	2,4E-06	9,5E-10	

Légende :

- 0 Aucun facteur de caractérisation
- 1 Facteur de caractérisation ReCiPe (H) v1.11
- 2 Facteur de caractérisation USEtox "Recommended" converti en ReCiPe (H) v1.11
- 3 Facteur de caractérisation USEtox "Interim" converti en ReCiPe (H) v1.11

Tableau 12. Facteurs de caractérisation pour les 12 métaux - Compartiment EAU

Compartiment EAU			Impacts (mid-point)					Dommages (end-point)			
			FC midpoint	Toxicité humaine	Ecotoxicité terrestre	Ecotoxicité eau douce	Ecotoxicité marine	FC endoint	Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources naturelles
Catégorie	Nom substance	Désignation	Unité -->	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	Unité -->	DALY / g	species.yr / g	\$/ g
ETM	Cadmium, ion	Cd2+	1	1,2E-01	1,9E-25	9,1E-03	7,1E-03	1	8,6E-08	9,1E-12	
	Mercuré	Hg	1	2,5E+01	6,4E-04	9,3E-02	7,5E-02	1	1,8E-05	1,9E-10	
	Nickel, ion	Ni2+	1	7,0E-03	1,3E-24	9,8E-02	9,6E-02	1	4,9E-09	1,0E-10	
	Plomb	Pb	1	2,2E-01	3,6E-29	4,1E-04	2,9E-04	1	1,5E-07	4,1E-13	
	Cobalt	Co	1	1,9E-22	7,6E-24	3,3E-02	3,3E-02	1	1,3E-28	3,4E-11	
	Arsenic, ion	As5+	1	1,5E+01	4,9E-26	1,6E-02	1,5E-02	1	1,0E-05	1,6E-11	
	Molybdène	Mo	1	1,3E+00	2,1E-26	1,8E-03	1,9E-03	1	9,1E-07	1,9E-12	
	Zinc, ion	Zn2+	1	3,6E-02	6,7E-26	7,5E-03	6,0E-03	1	2,5E-08	7,5E-12	
	Baryum	Ba	1	4,1E-01	3,4E-25	2,7E-03	2,8E-03	1	2,9E-07	2,8E-12	
	Cuivre	Cu	1	7,4E-04	5,9E-25	1,2E-01	1,0E-01	1	5,2E-10	1,2E-10	
	Chrome, ion	Cr3+	1	5,3E-07	1,1E-27	9,0E-04	6,7E-04	1	3,7E-13	8,9E-13	
	Vanadium, ion	V3+	1	3,7E-01	3,7E-24	9,6E-02	9,5E-02	1	2,6E-07	9,9E-11	

Légende :

- 0 Aucun facteur de caractérisation
- 1 Facteur de caractérisation ReCiPe (H) v1.11
- 2 Facteur de caractérisation USEtox "Recommended" converti en ReCiPe (H) v1.11
- 3 Facteur de caractérisation USEtox "Interim" converti en ReCiPe (H) v1.11

Tableau 13. Facteurs de caractérisation pour les 12 métaux - Compartiment SOL

Compartiment SOL			Impacts (mid-point)					Dommages (end-point)			
			FC midpoint	Toxicité humaine	Ecotoxicité terrestre	Ecotoxicité eau douce	Ecotoxicité marine	FC endoint	Santé humaine	Ecosystèmes	Ressources naturelles
Catégorie	Nom substance	Désignation	Unité -->	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	kg 1,4-DB eq / g	Unité -->	DALY / g	species.yr / g	\$/ g
ETM	Cadmium	Cd	1	5,5E-01	1,8E-02	7,8E-04	3,4E-04	1	3,9E-07	2,7E-09	
	Mercuré	Hg	1	9,4E+00	3,0E-01	9,8E-03	3,2E-02	1	6,6E-06	4,6E-08	
	Nickel	Ni	1	1,2E-03	1,1E-02	5,3E-03	3,1E-03	1	8,5E-10	1,6E-09	
	Plomb	Pb	1	3,0E-03	2,0E-05	1,3E-06	4,9E-07	1	2,1E-09	3,0E-12	
	Cobalt	Co	1	3,7E-22	1,7E-02	1,3E-02	8,0E-03	1	2,6E-28	2,6E-09	
	Arsenic	As	1	2,7E-01	2,3E-04	1,3E-04	7,6E-05	1	1,9E-07	3,4E-11	
	Molybdène	Mo	1	4,7E-02	3,7E-05	4,7E-05	2,9E-05	1	3,3E-08	5,6E-12	
	Zinc	Zn	1	6,6E-03	5,2E-03	2,7E-04	1,2E-04	1	4,6E-09	7,8E-10	
	Baryum	Ba	1	1,7E-01	6,9E-04	7,6E-04	4,8E-04	1	1,2E-07	1,0E-10	
	Cuivre	Cu	1	1,1E-04	1,7E-02	2,1E-03	1,0E-03	1	7,7E-11	2,6E-09	
	Chrome	Cr	1	1,4E-07	1,1E-04	4,5E-06	1,8E-06	1	9,8E-14	1,6E-11	
	Vanadium	V	1	4,4E-02	9,8E-03	6,2E-03	3,6E-03	1	3,0E-08	1,5E-09	

Légende :

- 0 Aucun facteur de caractérisation
- 1 Facteur de caractérisation ReCiPe (H) v1.11
- 2 Facteur de caractérisation USEtox "Recommended" converti en ReCiPe (H) v1.11
- 3 Facteur de caractérisation USEtox "Interim" converti en ReCiPe (H) v1.11

9.4. Composition des rejets en micropolluants pour quatre modèles de STEP

Tableau 14. Composition des rejets en micropolluants pour quatre modèles de STEP. Unité des valeur : g/(j*EH).

	Substances	Modèle A1	Modèle A2	Modèle B1	Modèle B2
ETM	Cadmium	1,26E-05	1,26E-05	1,26E-05	1,26E-05
	Mercure	6,48E-06	6,48E-06	6,48E-06	6,48E-06
	Nickel	7,97E-04	7,97E-04	7,73E-04	7,73E-04
	Plomb	3,16E-04	3,16E-04	4,01E-05	4,01E-05
	Cobalt	-	9,98E-05	-	9,98E-05
	Arsenic	-	3,37E-04	-	3,27E-04
	Molybdène	-	5,56E-04	-	5,50E-04
	Zinc	-	1,06E-02	-	2,08E-04
	Baryum	-	3,57E-03	-	3,39E-03
	Cuivre	-	1,65E-03	-	1,39E-03
	Chrome	-	2,94E-04	-	3,39E-05
	Vanadium	-	3,24E-04	-	3,21E-04
	CTO	Dichlorométhane	5,67E-05	5,67E-05	5,67E-05
Simazine		2,68E-06	2,68E-06	8,04E-08	8,04E-08
2,4-dichlorophénol		1,03E-04	1,03E-04	1,03E-04	1,03E-04

Modèle A1 : boues activées en aération prolongée (5200 EH) avec prise en compte de 7 micropolluants (situation actuelle dans ACV4E).

Modèle A2 : modèle A1 en élargissant la liste à 15 micropolluants (inclusion des 8 nouveaux ETM identifiés dans la présente étude).

Modèle B1 : modèle A1 avec traitement tertiaire (filtres sable et charbon actif)

Modèle B2 : modèle A2 avec traitement tertiaire (filtres sable et charbon actif)

9.5. Influence de la prise en compte de nouveaux micropolluants sur les résultats d'ACV : cas des filtres plantés de roseaux

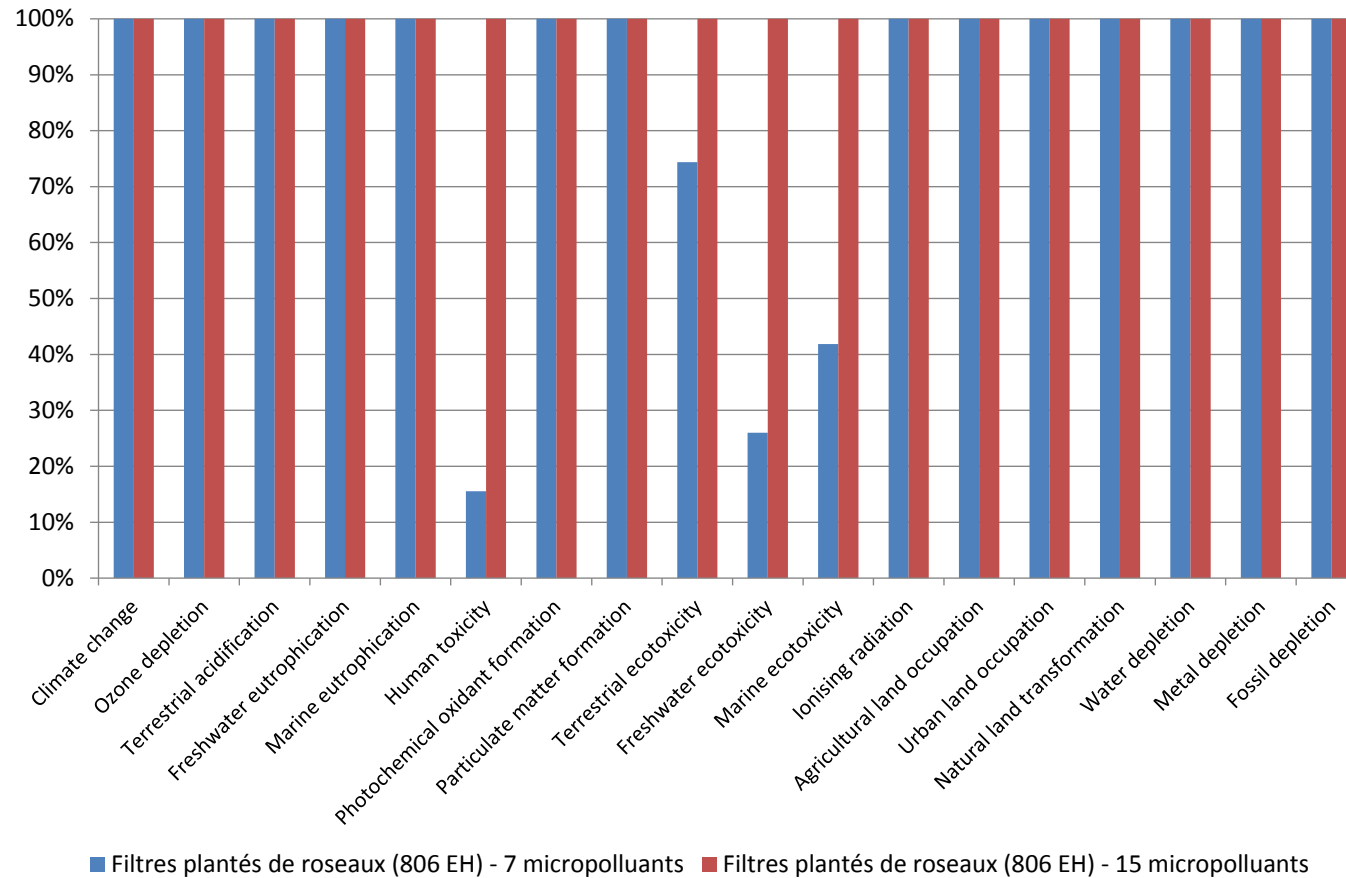


Figure 5. Influence de la prise en compte de nouveaux micropolluants sur les résultats d'ACV pour des filtres plantés de roseaux (méthode ReCiPe Midpoint (H) V1.11)