

Estimation des émissions de DEHP sur le bassin de la Seine

Valentin Chapon*¹, Jean-Marc Brignon*¹

¹ INERIS, Verneuil-en-Halatte, France

* jean-marc.brignon@ineris.fr, valentin.chapon@ineris.fr

Résumé

Le DEHP est un plastifiant utilisé depuis longtemps pour la production de PVC souple. Cette étude vise à estimer les émissions de ce produit chimique vers l'environnement sur le bassin de la Seine dans le cadre du projet de recherche PIREN-Seine. La méthode utilisée s'appuie sur les quantités de DEHP contenues dans les articles présents sur le bassin de la Seine. Pour cela les stocks d'articles contenant du DEHP sont estimés à partir des informations disponibles dans la littérature. Ensuite pour les différentes étapes du cycle de vie du DEHP, de la production de celui-ci aux traitements des déchets, les émissions de DEHP vers l'environnement sont comptabilisées en utilisant des facteurs d'émissions vers l'environnement respectifs pour chaque étape et pour chaque groupe d'article. Les émissions vers l'environnement se répartissent entre 4 compartiments : le sol, les eaux de surfaces, les eaux usées et l'air. Enfin l'impact d'une potentielle réglementation sur la production et la mise sur le marché de certains articles contenant du DEHP est testé.

L'estimation des stocks d'articles contenant du DEHP, montre que celui-ci est constitué en grande partie par les catégories d'articles fils et câbles, les tuyaux et profilés et les revêtements muraux et de sol.

Les pics d'émissions de DEHP en fonction des compartiments environnementaux se situent aux débuts des années 2000 ce qui correspond aux pics des quantités de DEHP contenues dans les stocks d'articles. L'estimation des émissions montrent que celles-ci se font en majeure partie vers le sol puis vers les eaux de surfaces et les eaux usées. Certains résultats ont pu être comparé à une étude précédemment réalisée dans le cadre du projet de recherche PIREN-Seine (Gasperi, Mouchel, & et al, 2016). La bonne concordance des ordres de grandeur est encourageante, et rend envisageable l'utilisation de prospectives d'émissions réalisées dans le cadre de ce travail pour des études sur le devenir de la contamination par des micropolluants comme le DEHP dans le bassin de la Seine.

Enfin les résultats de cette étude montrent que la mise en place d'une réglementation pour une partie des articles contenant ce produit chimique aurait un impact significatif sur les émissions de DEHP vers l'environnement, mais seulement sur le long terme, cet effet retard étant dû en partie à l'inertie des stocks de plastiques dans l'économie.

1 Introduction

Dans le cadre du programme de recherche PIREN-Seine Phase VII (2015-2019), un des objectifs est d'estimer les émissions de polluants qui touchent le bassin de la Seine. En termes de micropolluants organiques, cela implique de pouvoir mieux connaître et de prévoir les flux de substances chimiques générés par les activités humaines (notamment urbaines) sur le bassin. L'étude se place donc dans un cadre d'amélioration de la connaissance des flux de ces polluants et de leurs prévisions.

L'ensemble du travail, présenté dans ce rapport, est centré sur un polluant organique : le phtalate de bis(2-éthylhexyle) ou phtalate de di-2-éthylhexyle, appelé plus communément DEHP.

L'objectif de cette étude a été de comptabiliser les émissions de DEHP vers l'environnement sur le bassin de la Seine, pour l'ensemble des milieux (eau, air, sols) avec une attention particulière pour le milieu aqueux.

Pour cela une approche se basant sur l'utilisation du DEHP dans la vie économique sur le bassin de la Seine, notamment sa présence dans des articles utilisés par les consommateurs, contenant du DEHP a été développée. Puis en s'appuyant sur le cycle de vie de ces articles, la quantité de DEHP émise dans l'environnement pour les étapes suivantes a été estimée : la production du DEHP, la production d'articles contenant du DEHP, l'utilisation de ces articles et enfin la fin de vie de ces articles (sous forme de déchets).

Ce travail a été réalisé en s'appuyant sur les données présentes dans la littérature : dans des documents de réglementation, des documents d'estimation de flux ou des documents économiques sur les plastifiants... Il est à la fois rétrospectif et prospectif, et porte sur la période de 1960 à 2040.

2 Méthode utilisée et données associées

Dans cette partie la méthode utilisée pour estimer les quantités de DEHP émises dans l'environnement sera abordée. Dans un premier temps on présente les articles contenant du DEHP, ainsi que leur cycle de vie. Puis dans un deuxième temps les facteurs d'émission associés aux étapes du cycle de vie du DEHP et des articles seront explicités et enfin les autres données et les hypothèses permettant de comptabiliser les quantités de DEHP seront détaillées.

2.1 Présentation des articles contenant du DEHP identifiés dans la littérature

Le DEHP est utilisé depuis 1933 au Japon et depuis 1939 aux Etats-Unis (IARC, 2011). Ce produit chimique est un plastifiant, qui est utilisé pour les propriétés de souplesse qu'il confère aux matériaux plastiques (presque uniquement le « PVC souple ») auxquels il est ajouté, en proportion à environ 30%. Environ 97% du DEHP est utilisé pour la production de PVC (Norwegian Institute for Air Research, 2007)¹. Les 3% restant sont utilisés pour différents types d'articles comme par exemple les adhésifs ou la peinture.

¹ Il existe deux sortes de PVC, le PVC souple et le PVC rigide. La production de PVC rigide, ne nécessite pas de DEHP, il n'est donc pas concerné par cette étude. Le PVC rigide est utilisé pour la fabrication de tuyaux en grande partie mais aussi pour certains jouets et fenêtres. Le PVC souple contrairement au PVC rigide contient du DEHP pour ses propriétés de souplesse et est utilisé pour les câbles et les revêtements de sol notamment.

On retrouve le DEHP dans les produits suivants :

Tableau 1 : Types d'articles contenant du DEHP

Type d'articles	Traduction	Exemple d'utilisation	Type d'usage
Article PVC			
« <i>Flooring</i> »	Matériaux de revêtement de sol	Sol vinyle...	Intérieur
« <i>Wall covering</i> »	Matériaux de revêtement mural	Revêtement mural/papier peint en vinyle...	Intérieur
« <i>Coated fabric</i> »	Tissus plastifiés	Vêtements, nappes, imitations cuir, matelas gonflables, gants, bagages...	Intérieur & extérieur
« <i>Film/sheet & coated product</i> »	Films/papiers plastiques et produits enduits	Papiers d'emballage, rideaux de douches...	Intérieur & extérieur
« <i>Wires and cables</i> »	Fils et câbles	Câbles informatiques, câbles électriques...	Intérieur & extérieur
« <i>Moulded products</i> »	Produits moulés	Jouets, semelles...	Intérieur & extérieur
« <i>Medical devices</i> »	Équipements médicaux	Tubes, poches, seringues...	Intérieur
« <i>Roofing calendered & coil coated</i> »	Toitures plastifiées	Toitures plastifiées produites par calandrage, toitures plastifiées produites par enduction avec bobine	Extérieur
« <i>Hoses and profiles</i> »	Tuyaux et profilés	Tuyaux, joints de fenêtre...	Intérieur & extérieur
« <i>Car undercoating</i> »	Sous couche de protection ² pour châssis de voiture		Extérieur
Articles non PVC			
« <i>No polymers articles</i> »	Différents articles non PVC	Certains mastics et adhésifs, laques et peintures, et encres pour impression...	Intérieur & extérieur

² Protection à l'usure, la rouille et la corrosion

2.2 Présentation de la méthode

L'ensemble de l'étude est basé sur une méthode consistant à définir pour chaque étape du cycle de vie d'un article contenant du DEHP des "facteurs d'émission" (FE) vers l'environnement. Cette méthode permettra notamment de réaliser des inventaires rétrospectifs et prospectifs des émissions, en étudiant l'impact de diverses mesures pour les limiter, comme par exemple la mise en place d'une réglementation sur l'utilisation du DEHP. La figure ci-après présente le cycle de vie du DEHP.

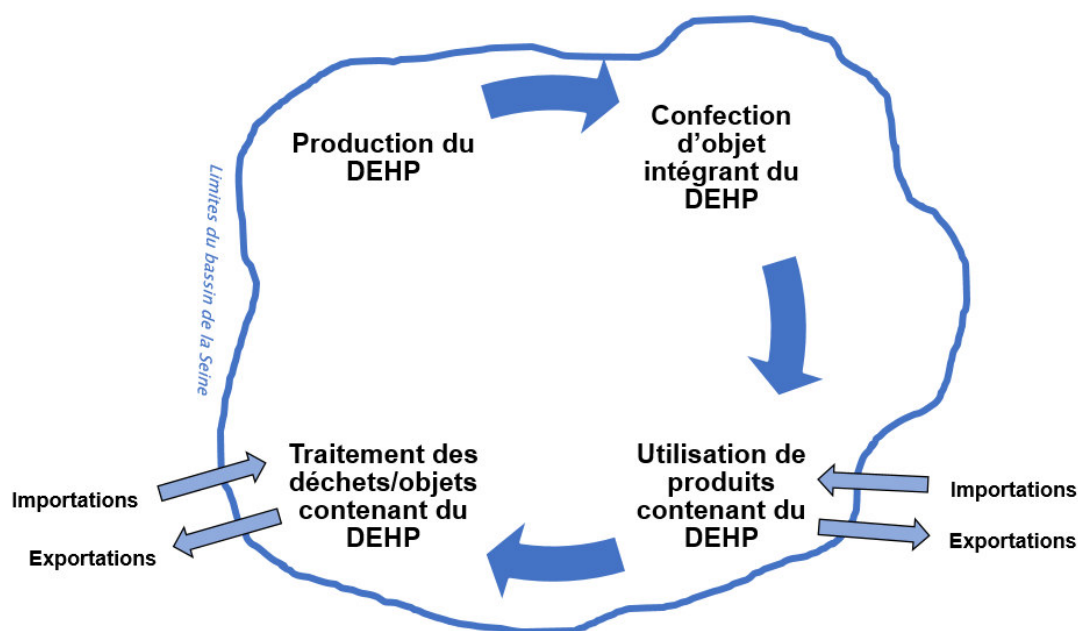


Figure 1 : Cycle de vie du DEHP : inspiré de (European-Chemicals-Bureau, 2008)

On distingue quatre étapes dans le cycle de vie du DEHP :

- La production du DEHP
- La confection d'objets contenant du DEHP
- L'utilisation d'objets contenant du DEHP
- Le traitement des objets contenant du DEHP en fin de vie

Il existe une dernière source d'émissions de DEHP non illustrée dans le cycle de vie de ces articles. Il s'agit de la dislocation des articles lors de leur utilisation et lors de leur traitement en fin de vie. Ces « morceaux » d'objets libérés vont émettre ensuite une partie non négligeable de DEHP dans l'environnement. Ce phénomène sera inclus dans l'étude pour les articles à usage extérieur³ mais pas pour les articles à usage intérieur⁴, cela est dû à une absence de données. En effet l'étude (European-Chemicals-Bureau, 2008) sur laquelle ce travail s'est appuyé, en grande partie pour les facteurs d'émission, a mentionné une absence de données dans la littérature à ce sujet.

³ Sont définis à usage extérieur, les articles utilisés dans un environnement non fermé, exemple : jardin, usage agricole...

⁴ Sont définis à usage intérieur, les articles utilisés dans un environnement fermé, exemple : habitation, habitacle de voiture...

Pour un type d'article donné, à une étape du cycle de vie donnée, les émissions E sont estimées par l'équation ci-après (Gouzy & Brignon, 2012) :

$$Emissions (E) = Facteurs d'émissions(FE) * Quantité utilisée (Q)$$

La « quantité utilisée » équivaut à une donnée d'activité, elle peut correspondre en fonction de l'étape du cycle de vie : à la quantité de DEHP ou de PVC produite, à la quantité de DEHP contenue dans les articles utilisés, à la quantité de déchets traitée.

Ainsi pour chaque étape du cycle du vie et pour chaque année, afin d'estimer les quantités de DEHP émises dans l'environnement sur le bassin de la Seine les quantités de DEHP produites, transformées, utilisées, et présentes dans des articles sur le bassin de la Seine doivent être connues. Cependant faute de données disponibles les phénomènes d'imports et d'exports n'ont pas été pris en compte. Enfin à ces quantités de DEHP sont associés des facteurs d'émissions, présentés dans la partie suivante.

2.3 Présentation des facteurs d'émissions

Comme expliqué ci-avant, les facteurs d'émissions sont associés à une étape du cycle de vie du DEHP et à un type d'article donné. L'ensemble des facteurs d'émissions présentés dans les tableaux ci-après sont utilisés dans un fichier Excel pour estimer les émissions de DEHP vers l'environnement. La plupart de ces facteurs d'émissions sont tirés d'un document européen d'évaluation de risques environnementaux et sanitaires spécifiques pour la molécule DEHP (European-Chemicals-Bureau, 2008). Les facteurs d'émissions sont récapitulés par étape du cycle de vie et par type d'articles dans les tableaux suivants :

Tableau 2 : Production du DEHP

	Facteur d'émissions (FE) (<i>Exprimés en % de DEHP produit</i>)	Source
Production de DEHP	FE air, FE sol, FE eaux usées ⁵	(Norwegian Institute for Air Research, 2007)

⁵ Les émissions vers les eaux usées comptabilisent les émissions vers les milieux aquatiques avant épuration

Tableau 3 : Production des articles contenant du DEHP

Type d'articles	Méthode de production	Facteur d'émissions (Exprimés en % de DEHP utilisé lors de la production)	Source
Films/papiers plastiques et produits enduits, toitures plastifiées produites par calandrage	Calandrage	FE air, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Fils et câbles, tuyaux et profilés	Extrusion	FE air, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Produits moulés	Moulage par injection	FE air, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Toitures plastifiées produite par enduction avec bobine, matériaux de revêtement de sol et muraux	Enduit projeté « <i>spread coating</i> »	FE air, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Sous couche de protection pour châssis de voiture	Autres <i>plastisols</i>	FE air, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)

Le Tableau 3 présente pour chaque type d'article, la méthode de production qui lui est associée. Pour information les facteurs d'émissions tirés de : (European-Chemicals-Bureau, 2008) ont été calculés en utilisant les données recueillies sur une dizaine de site de production de PVC.

Tableau 4 : Emissions lors de l'utilisation d'articles contenant du DEHP

Type d'articles	Facteur d'émissions (<i>exprimés en % de DEHP contenu dans l'objet</i>)	Source
Tous PVC à usage intérieur hors revêtement de sol	FE air	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Revêtement de sol	FE air, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Tous PVC à usage extérieur	FE air, FE sol, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Non PVC à usage intérieur	FE air, FE eaux usées	(European-Chemicals-Bureau, 2008)
Non PVC à usage extérieur	FE air, FE eaux de surface ⁶	(European-Chemicals-Bureau, 2008)

Le Tableau 4 présente les facteurs d'émission en fonction des compartiments d'émission, pour l'utilisation d'articles contenant du DEHP. Ces compartiments dépendent essentiellement de l'usage extérieur ou intérieur des objets.

Tableau 5 : Dislocation des objets et émissions des déchets dans l'environnement

Type d'articles	Facteur d'émissions (% d'émissions appliqué à un % de plastique disloqué lors de la vie de l'article)	Source
Tous PVC à usage extérieur	FE air, FE eau de surface, FE sol	(European-Chemicals-Bureau, 2008)

Le Tableau 5 illustre le phénomène de dislocation des articles tout au long de leur utilisation et de leur traitement. Ce paramètre est seulement pris en compte pour les articles à usage extérieur, fautes de données pour les articles à usage intérieur.

⁶ Les émissions vers les eaux de surfaces contrairement aux émissions vers les eaux usées se sont pas traitées et vont directement vers le milieu aquatique

Tableau 6 : Emissions lors du traitement en fin de vie des articles

Type d'articles	Facteur d'émissions (% d'émissions appliqué à la quantité de DEHP traité)	Source
Tous PVC à usage extérieur	FE environnement	(Cadogan et al, 1993)

Le Tableau 6 présente le facteur d'émission utilisé pour l'étape de traitement des déchets. Ce pourcentage d'émissions est appliqué à la quantité de DEHP contenue dans les articles qui sont traités. Contrairement aux émissions pour les autres parties du cycle de vie, celles-ci n'ont pas de compartiment environnemental spécifique.

2.4 Quantités de DEHP produites, utilisées par l'industrie, mises sur le marché : données et hypothèses

Cette partie présente l'ensemble des données et des hypothèses utilisées pour estimer les quantités de DEHP produites, utilisées par l'industrie et mises sur le marché au niveau du bassin de la Seine.

2.4.1 Données utilisées et hypothèses

En se basant sur les informations présentes dans la littérature, et plus précisément sur les informations du site : (www.pvc.org, s.d.) on prendra pour hypothèse que le DEHP a commencé à être produit en 1945, après la seconde guerre mondiale. En effet l'utilisation du DEHP a commencé dès 1913 en Allemagne, 1933 au Japon et 1943 aux Etats-Unis mais l'utilisation s'est fortement répandue lors de la seconde guerre mondiale, notamment pour la confection de câbles.

L'ensemble des données collectées issues de la littérature mais aussi l'absence de données sont présentées, par année, dans le Tableau 7 ci-après.

Tableau 7 : Disponibilité des données sur les quantités de DEHP produites, utilisées par l'industrie et mises sur le marché entre 1945 et 2040, en fonction de leurs sources (A, B, C, D)

Année	1945	...	1973	1993	1997	2004	2007	2011	...	2040
Quantité de DEHP produite	1			Q (totale) ⁷ ; Source D	Q (totale) ; Source A	Q (totale) ; Source A	Q (totale) ; Source A			
Quantité de DEHP utilisée par l'industrie	1			Q (totale) ; Source D	Q (article) ⁸ ; Source A		Q (article) ; Source B	Q (ECHA) ⁹ ; Source C	Q (ECHA) ; Source C	Q (ECHA) ; Source C
Quantité de DEHP contenue dans les objets mis sur le marché	1		Q (totale) ; Source D	Q (totale) ; Source D	Q (article) ; Source A		Q (article) ; Source B	Q (ECHA) ; Source C	Q (ECHA) ; Source C	Q (ECHA) ; Source C

⁷ Q(totale) : données disponibles = quantité totale de DEHP

⁸ Q(article) : données disponibles = quantité totale de DEHP détaillée par type d'article

⁹ Q(ECHA) : données disponibles = quantité de DEHP dans le cadre de la réglementation REACH, détaillée par type d'article

Tableau 8 : Récapitulatif des sources de données utilisées pour estimer les quantités de DEHP

SOURCES	Symbole
<u>Estimation de flux de substances vers l'environnement :</u> “Norwegian Institute for Air Research. (2007). <i>SOCOPSE Workpackage 2 – D2.1.</i> ”	A
<u>Panorama économique du DEHP :</u> “COWI. (2009). <i>Data on manufacture, import, export, uses and releases of bis(2-ethylhexyl) phthalate (dehp) as well as information on potential alternatives to its use.</i> ”	B
<u>Règlementation REACH:</u> “ECHA. (2017). <i>Annex to the background document to RAC and SEAC opinions on four phthalates (DEHP, BBP, DBP, DIBP).</i> ”	C
<u>Règlementation UE sur les Produits Chimiques :</u> Bureau European Chemicals. (2008). <i>European Union Risk Assessment Report : bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP).</i> European Communities.	D

Comme l'illustre le Tableau 7 peu de données sont disponibles entre 1945 et 1993, qu'il s'agisse de quantités de DEHP produites, utilisées par l'industrie ou mises sur le marché. En utilisant les données de production mondiale de PVC entre 1950 et 2010 disponibles dans l'ouvrage suivant : « Toxicology, survival and health hazards of combustion products » (David Purser, 2015), il est possible de déduire la tendance de la courbe de production mondiale de PVC. Ces données de production de PVC ont une forme exponentielle. En considérant que la production de PVC est fortement corrélée à la production de DEHP, cette tendance exponentielle sera utilisée, pour estimer les quantités de DEHP des années 1945 aux années 1990. Puis à partir de l'année 1997, étant donné qu'un plus grand nombre de données est disponible, des projections linéaires sont réalisées entre les données pour estimer les données manquantes.

Enfin pour obtenir des quantités de DEHP par type d'article pour chaque année, des ratios sont utilisés. En 1997 par exemple, la quantité de DEHP contenue dans les articles mis sur le marché est connue tout comme la quantité de DEHP mise sur le marché par type d'article. Par conséquent pour obtenir la quantité de DEHP mise sur le marché par type d'article en 1996, par exemple pour les tissus plastiques, l'équation suivante est utilisée :

$$Q_{DEHP \text{ tissus plastique } 1996} = Q_{DEHP \text{ 1996}} * \frac{Q_{DEHP \text{ tissus plastique } 1997}}{Q_{DEHP \text{ 1997}}}$$

A partir de 2011 des données provenant de l'Agence Européenne de Produits Chimiques (ECHA) sont disponibles, sur la période 2011-2040, pour les produits entrant dans la réglementation proposée. Cet organisme a estimé les quantités d'articles, en se basant sur des données Eurostat.

La réglementation proposée par l'ECHA (ECHA, 2016), aujourd'hui encore en discussion, s'appliquerait à certains articles contenant des phtalates. Les conditions de restrictions seraient les suivantes :

- Les articles contenant plus ou moins 0.1% du poids de l'objet en DEHP (ou autres phtalates comme le DBP, DIBP ou le BBP).
- Les articles qui de par leur usage présentent un contact prolongé avec la peau, les muqueuses ou pouvant être mis à la bouche
- Les articles à usage intérieur pouvant présenter une potentielle exposition par inhalation

D'autre part cette restriction ne s'appliquerait pas aux articles ayant les caractéristiques suivantes :

- Les articles de mesure utilisés en laboratoire
- Certains articles pour enfant
- Les articles présents sur le marché européen au moins 3 ans avant la mise en place de la réglementation
- Les articles dont l'usage présente un contact avec l'alimentation
- Les articles à usage médical
- Certains matériels électriques ou électroniques
- Les articles présents sur les lieux de travail agricoles ou industriels

Pour conclure cette réglementation viserait à toucher les articles suivants :

- Les matériaux de revêtement de sol ou muraux
- Les produits plastifiés et les films plastiques
- Les articles à usages récréatifs
- Les matelas
- Les chaussures
- Les fournitures et équipement de bureau
- Les fils et les câbles
- Les articles en plastiques moulés ou en plastique enduit

Les estimations utilisées (ECHA, 2016) ne concernent donc que les articles rentrant dans le cadre du règlement européen REACH sur les produits chimiques. Pour les articles concernés cette source de données est utilisée, en revanche pour les articles exclus de cette réglementation, une décroissance de 1 % par an en quantité est supposée par l'ECHA sur la base des études de marché disponibles.

Dans cette partie l'ensemble des données provenant de la littérature sont des données de quantité de DEHP au niveau européen. Dans le but d'obtenir des quantités de DEHP pour le bassin de la Seine, des moyennes pondérées ont été effectuées en estimant que la production de DEHP, l'utilisation de DEHP par l'industrie et la consommation d'articles contenant du DEHP était spatialement homogène au niveau européen. Pour cela le ratio suivant a été utilisé :

$$\text{ratio de population} = \frac{\text{population du bassin de la Seine}}{\text{population européenne}}$$

Faute de données historiques et prospectives disponibles pour la population du bassin de la Seine le ratio de population est constant pour la période étudiée, le ratio utilisé est calculé pour l'année 2015.

Par la suite il serait également intéressant de disposer de données précises au niveau du bassin de la Seine, en ce qui concerne les centres de production de DEHP, les usines de production d'articles contenant du DEHP, les spécificités éventuelles en termes de consommation d'articles en PVC, et les zones de traitements des déchets d'articles contenant du DEHP. Cela pourrait permettre d'éliminer notamment certaines émissions liées à des sites de production, si celles-ci sont localisées à l'extérieur de la zone d'étude.

2.4.2 Estimation des stocks de DEHP dans les articles

Les quantités de DEHP utilisées par l'industrie et de ce fait contenues dans les différents types d'articles sont seulement disponibles pour les années 1997 et 2007. Cependant l'ensemble des articles présents sur le marché en 1997 n'est pas le même que celui en 1950. On supposera que les articles sont apparus chronologiquement dans le temps et que les catégories d'articles présentes en 1960 et 1997 sont identiques. Les articles sont donc apparus entre 1946 et 1960. Leurs dates d'apparition sont représentées dans le tableau ci-après.

Tableau 9 : Date de première utilisation des articles contenant du DEHP (PVC et NON PVC)

Type d'article	Date de première utilisation	Source
Matériaux de revêtement de sol	1975	(Kleijn & et al , 2000)
Matériaux de revêtement muraux	1975	(Kleijn & et al , 2000)
Tissus plastifiés	1960	(wikipédia, s.d.)
Films/papiers plastifiés et produits enduits	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)
Fils et câbles	1965	(Kleijn & et al , 2000)
Produits moulés (usage intérieur)	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)
Produits moulés (usage extérieur)	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)
Toitures plastifiées	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)
Tuyaux et profilés	1960	(Kleijn & et al , 2000)
Sous couche de protection pour châssis de voiture	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)
Mastics et adhésifs	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)
Laques et peintures	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)
Encres pour impression	1960	(COWI & Danish Technological Institute, 2013)

Après avoir déterminé les quantités d'articles mis sur le marché chaque année il est indispensable d'estimer le stock d'articles présents chaque année sur le bassin de la Seine, car il contribue aux émissions de DEHP. Pour une catégorie d'articles donnée, pour estimer le stock de DEHP de l'année « n » la formule suivante a été utilisée (Kleijn & et al , 2000) :

$$Stock(n) = Stock(n-1) + Q(marché) - Stock(n - durée de vie de l'article)$$

Avec « $Q(marché)$ » qui correspond à la quantité de DEHP mise sur le marché et « $Stock(n - durée de vie de l'article)$ » qui correspond à la quantité de DEHP dans les articles en fin de vie qui deviennent des déchets à l'année n. Enfin « $Stock(n)$ » et « $Stock(n-1)$ » correspondent respectivement au stock de DEHP de l'année en cours et de l'année passée.

Tableau 10 : Durées d'utilisation des articles contenant du DEHP

Type d'article	Durée d'utilisation	Source
Matériaux de revêtement de sol	15	(Kleijn & et al , 2000)
Matériaux de revêtement mural	15	<i>Hypothèse</i>
Tissus plastifiés	10	(Norwegian Institute for Research, 2007)
Films/papiers plastifiés et produits enduits	5	<i>Hypothèse</i>
Fils et câbles	30	(Kleijn & et al , 2000)
Produits moulés (usage intérieur)	10	<i>Hypothèse</i>
Produits moulés (usage extérieur)	5	(Norwegian Institute for Research, 2007)
Toitures plastifiées	20	(Norwegian Institute for Research, 2007)
Tuyaux et profilés	30	(Norwegian Institute for Research, 2007)
Sous couche de protection pour châssis de voiture	12	(Norwegian Institute for Research, 2007)
Mastic et adhésif	20	(Norwegian Institute for Research, 2007)
Laques et peintures	7	(Norwegian Institute for Research, 2007)
Encre pour impression	1	(Norwegian Institute for Research, 2007)

2.5 Principales hypothèses pour les Scénarios prospectifs

La méthodologie d'estimation des émissions de polluants par facteurs d'émission s'adapte à la construction de scénarii de prévision de production et de consommation de DEHP en fonction de l'édiction de réglementations actuelles et futures et de l'évolution du marché.

Le but de la construction de scénarios et d'estimer ensuite pour chacun d'eux les cinétiques de décroissance des stocks de DEHP dans les articles et matériaux présents sur le bassin, et des émissions de DEHP sur le bassin de la Seine.

Pour la construction des scénarios, ce travail s'est appuyé sur la réglementation REACH qui prévoit d'interdire en Europe la production et l'importation d'articles contenant du DEHP à usage intérieur et/ou pouvant présenter un contact avec la peau important¹⁰. Cette réglementation ne s'applique pas aux articles à usage industriel ou agricole ainsi qu'aux plastiques à usage médical. Plus de détails sont disponibles dans la partie Données utilisées et hypothèses ou à (ECHA, 2016). Deux scénarios seront donc étudiés :

- Un scénario de référence dans lequel, à partir de 2020, les quantités de DEHP liées aux articles dans le cadre de la réglementation **REACH** ne sont pas nulles mais suivent une décroissance faible (utilisation des prédictions ECHA). Les articles en dehors de la réglementation suivent une décroissance de 1% par an.
- Un scénario, appelé scénario avec réglementation où à partir de 2020 les quantités de DEHP liées aux articles produits, importés et exportés dans le cadre de la réglementation REACH sont nulles. Pour les articles en dehors de la réglementation les quantités suivent une décroissance de 1%.

3 Résultats : quantités de DEHP présentes sur le bassin de la seine et émissions associées

Les résultats obtenus suite à l'exploitation des données en suivant la méthodologie et les hypothèses présentées dans la partie précédente sont présentés ici.

3.1 Quantités de DEHP présentes sur le bassin de la Seine

Cette partie traite des quantités de DEHP contenues dans les articles des stocks d'objets présents sur le bassin de la Seine.

La

Figure 2 et la Figure 3 permettent d'illustrer l'importance relative de chacun des types d'articles quant à leur contribution à la quantité totale de DEHP. Dans les deux scénarios, celui de référence ou celui avec réglementation, es groupes d'articles qui constituent les stocks de DEHP les plus importants sont les fils et les câbles, les tuyaux et profilés, les revêtements muraux, les tissus plastiques et enfin les films plastiques. Les types d'articles restant détiennent des quantités de DEHP plus faibles et relativement équivalentes.

¹⁰ Principaux articles concernés par la réglementation REACH : les matériaux de revêtement de sol ou muraux, les produits plastifiés et les films plastiques, les articles à usages récréatifs, les matelas, les semelles de chaussures, les fournitures et équipements de bureau, les fils et les câbles, les articles en plastiques moulés ou en plastique enduit... Principaux articles non concernés par la réglementation REACH : tuyaux, films plastiques agricoles, sous-couche de protection de châssis de voiture,...

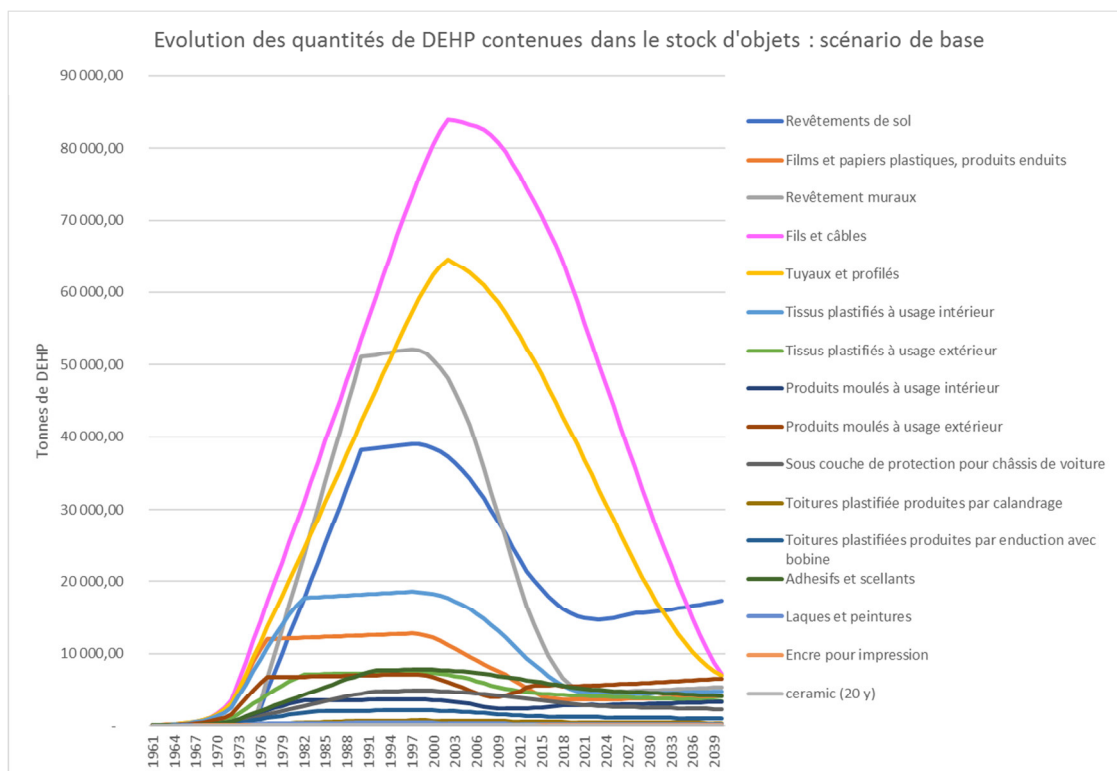


Figure 2 : Quantité de DEHP contenue dans les stocks d'articles sur le bassin de la Seine : cas du scénario de base

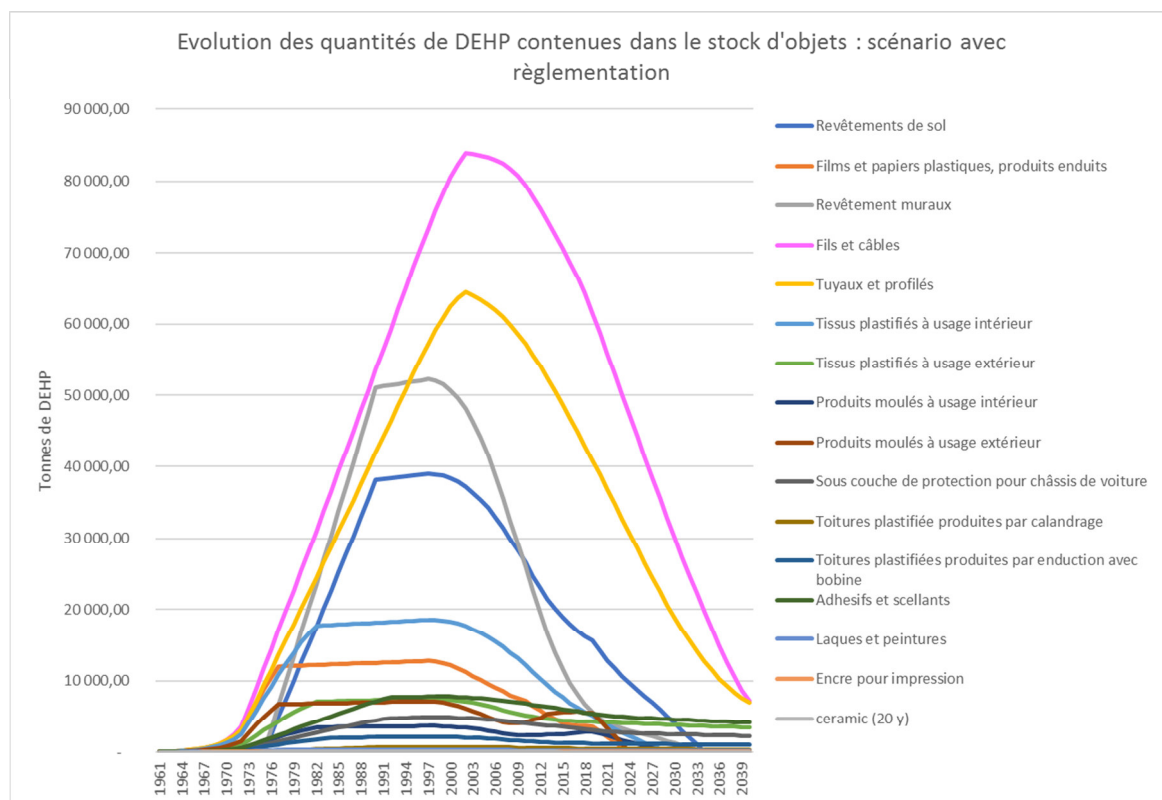


Figure 3 : Quantité de DEHP contenue dans les stocks d'articles sur le bassin de la Seine : cas du scénario avec réglementation

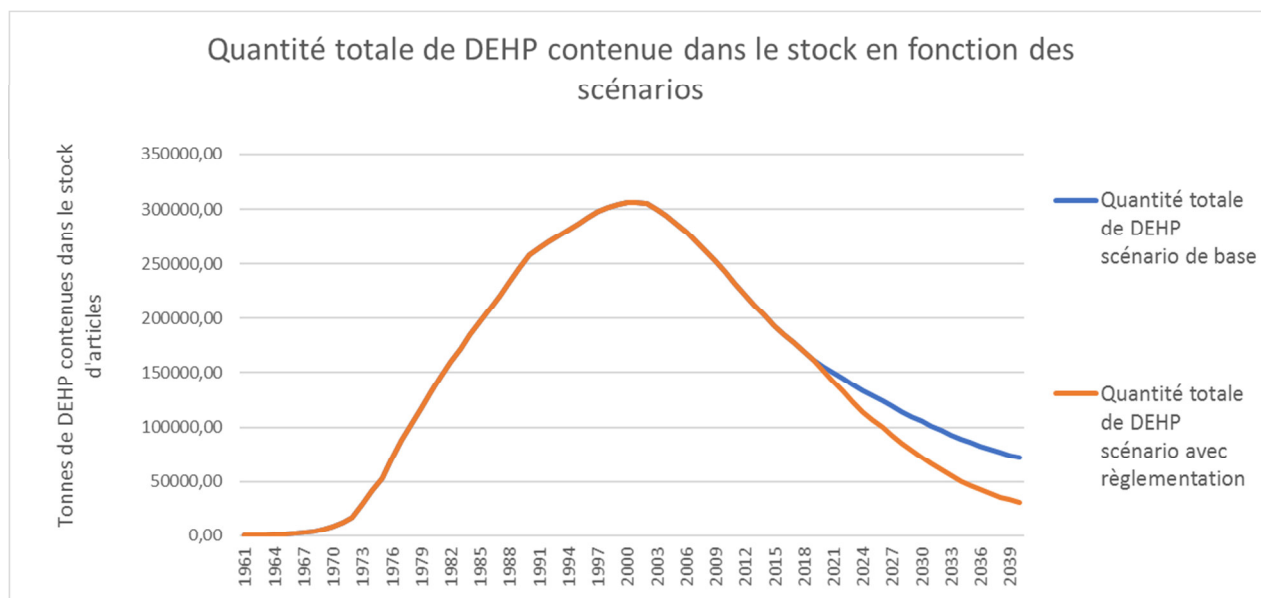


Figure 4 : *Quantité de DEHP contenue dans l'ensemble du stock d'articles sur le bassin de la Seine : cas du scénario avec réglementation*

Si l'on observe la Figure 4 on remarque que la décroissance de la quantité de DEHP contenue dans les stocks d'articles, décroît dans les deux scénarios à partir de 2002. Malgré une diminution des articles mis sur le marché cette décroissance est lente. En effet le stock présente une inertie liée à la durée de vie des articles qui est certainement sous-estimée car le recyclage n'est pas pris en compte à ce stade de notre travail. Néanmoins le stock d'articles et donc logiquement la quantité de DEHP qu'il détient, décroît plus rapidement dans le scénario avec la prise en compte de la réglementation REACH. Celle-ci est plus rapide, à partir de 2020, moment où la réglementation est mise en place. A partir de cette date le volume de DEHP dans les articles entrant dans le cadre de la réglementation mis sur le marché est nul.

3.2 Emissions de DEHP

Après avoir présenté la quantité de DEHP présente sur le bassin de la Seine cette partie se focalise sur l'objectif de ce travail : les émissions de DEHP dans l'environnement.

Dans la littérature les émissions de DEHP sont distribuées en quatre catégories :

- L'air
- Les eaux de surfaces
- Les eaux usées
- Les sols

Les émissions vers les eaux usées et vers les eaux de surfaces sont différentes. En effet les émissions vers l'eau sont fonctions de l'étape du cycle de vie de l'article, du type d'article et de l'usage intérieur ou extérieur du produit plastique. Par exemple les émissions vers l'eau liées à l'utilisation d'articles à usage intérieur sont exclusivement vers les eaux usées alors que pour les articles à usage extérieur les émissions vers l'eau sont très majoritairement vers les eaux de surfaces ; à noter le cas particulier des sous-couches pour châssis de voiture qui émettent vers les deux. Cette distinction provient de la source de données utilisées pour les facteurs d'émission (European-Chemicals-Bureau, 2008). Il n'y a donc pas de double comptage pour ces deux types d'émissions vers le « compartiment eau » mais il serait possible de convertir les émissions vers les eaux usées en émissions vers les eaux de surface en utilisant un facteur représentant l'efficacité du traitement du DEHP dans les stations d'épuration. L'outil de calcul d'émissions EUSES (**E**uropean **U**nion **S**ystem for the **E**valuation of **S**ubstances)

utilise un facteur de 30% (European-Chemicals-Bureau, 2008). Le compartiment environnemental sol est composé des émissions vers le compartiment « sol » et vers le compartiment « sol urbain ». Par définition le sol urbain ne représente que les 10 cm supérieurs du sol (European-Chemicals-Bureau, 2008). Aucun article de la confection à la fin de vie n'émet à la fois vers le sol urbain et vers le sol pour une étape de son cycle de vie.

Les émissions sont détaillées par catégorie d'articles vers les eaux usées et vers les eaux de surface puis les émissions vers le sol seront présentées ci-après.

La Figure 13, la

Figure 5 et la Figure 6 montrent qu'une grande partie des émissions, 400 tonnes au moment du pic au début des années 2000, sont émises par les matériaux de revêtement de sol. Les sous-couches de protection pour les châssis de voitures émettent environ 33 tonnes par an au début des années 2000, cela représente la seconde source d'émissions. Le reste des catégories d'articles n'émettent pas plus de 5 tonnes par an au moment du pic mise à part les adhésifs et scellants qui émettent 6 tonnes par an.

Dans le scénario sans réglementation, les quantités de DEHP émises vers les eaux usées par les matériaux de revêtement de sol augmentent après 2020. Cette augmentation est justifiée par une augmentation des quantités de DEHP mises sur le marché selon les données fournies par le document de l'ECHA. (ECHA, 2016).

Les Figure 7 et Figure 8 illustrent les émissions de DEHP vers les eaux usées dans le cadre de la mise en place de la réglementation REACH en 2020. L'ordre d'importance d'émissions par catégories d'objets est le même que pour le scénario de base sans réglementation. De plus mis à part les émissions de DEHP en provenance des matériaux de revêtement de sol, qui diminuent fortement après le début des années 2000 et qui sont nulles vers 2035, il a peu de changements pour les émissions de DEHP. En effet les catégories d'articles qui émettent le plus, après la catégorie « revêtement de sol » vers les eaux usées ne sont pas incluses dans la réglementation REACH.

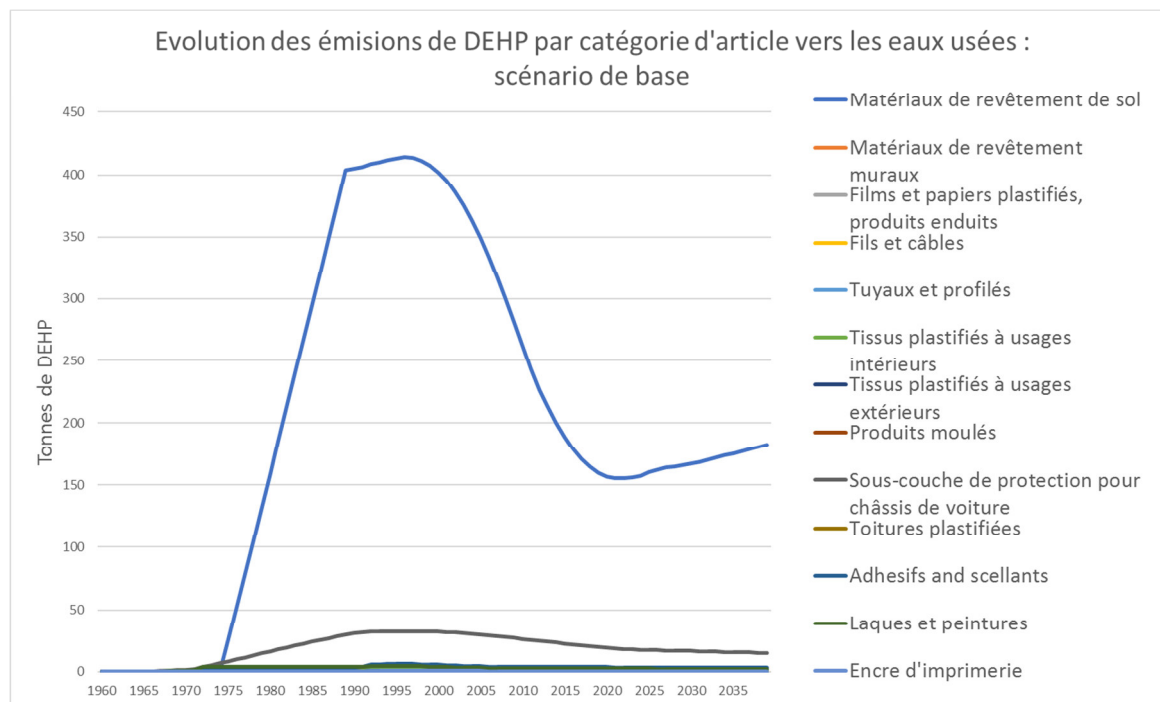


Figure 5 : Emissions de DEHP vers les eaux usées : scénario de base

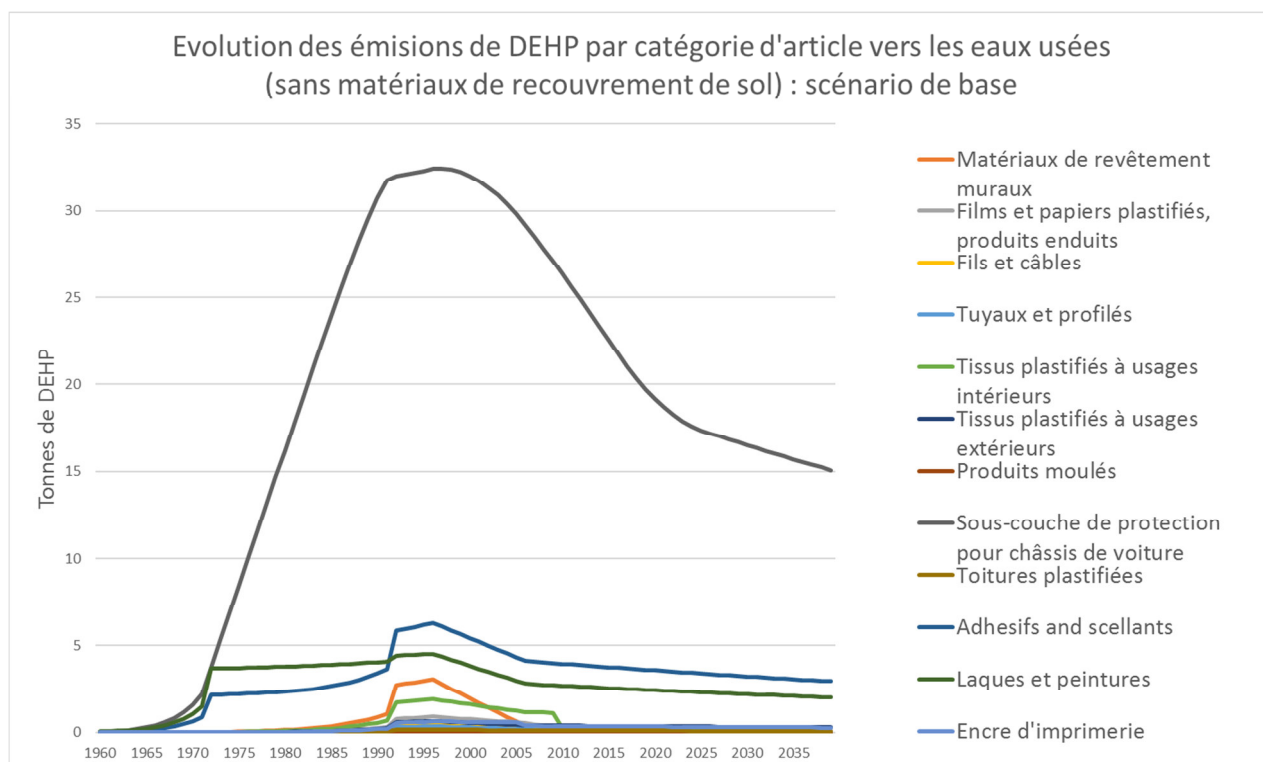


Figure 6 : Emissions de DEHP vers les eaux usées : scénario de base (sans la catégorie matériaux de revêtement de sol)

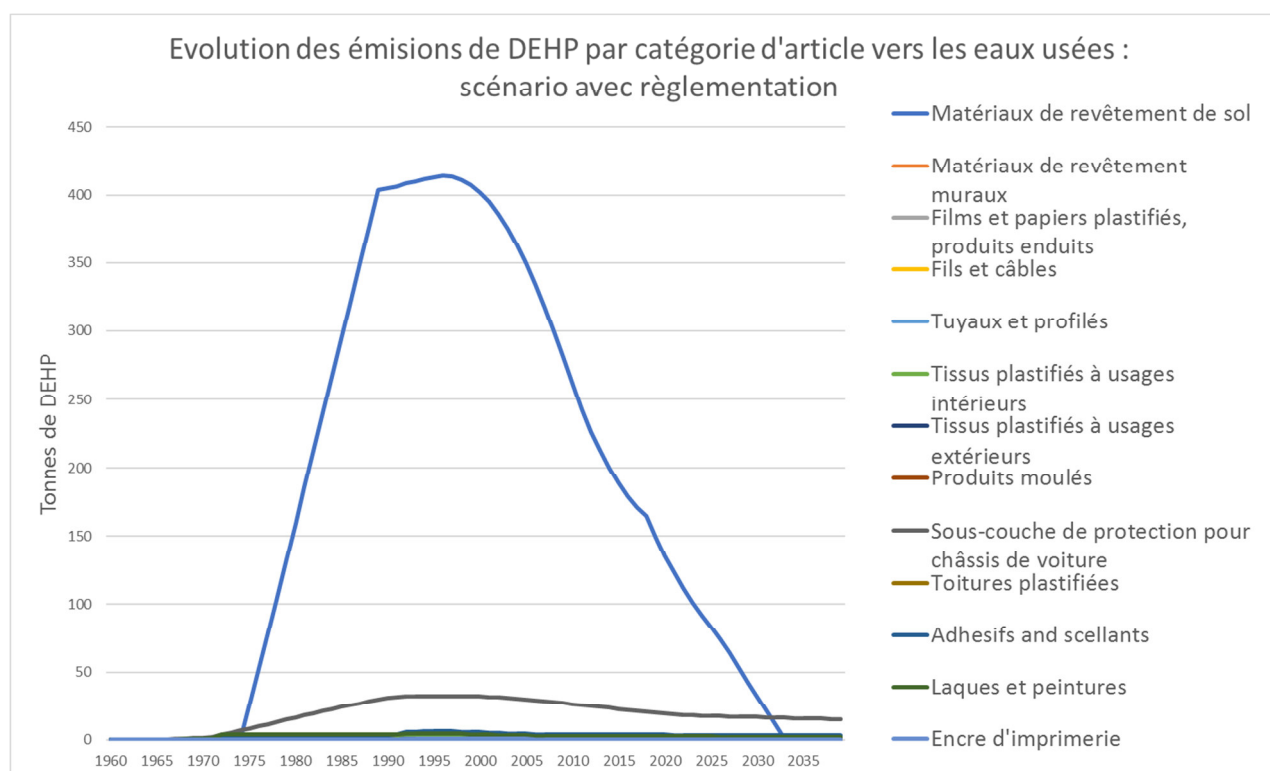


Figure 7 : Emissions de DEHP vers les eaux usées : scénario avec réglementation

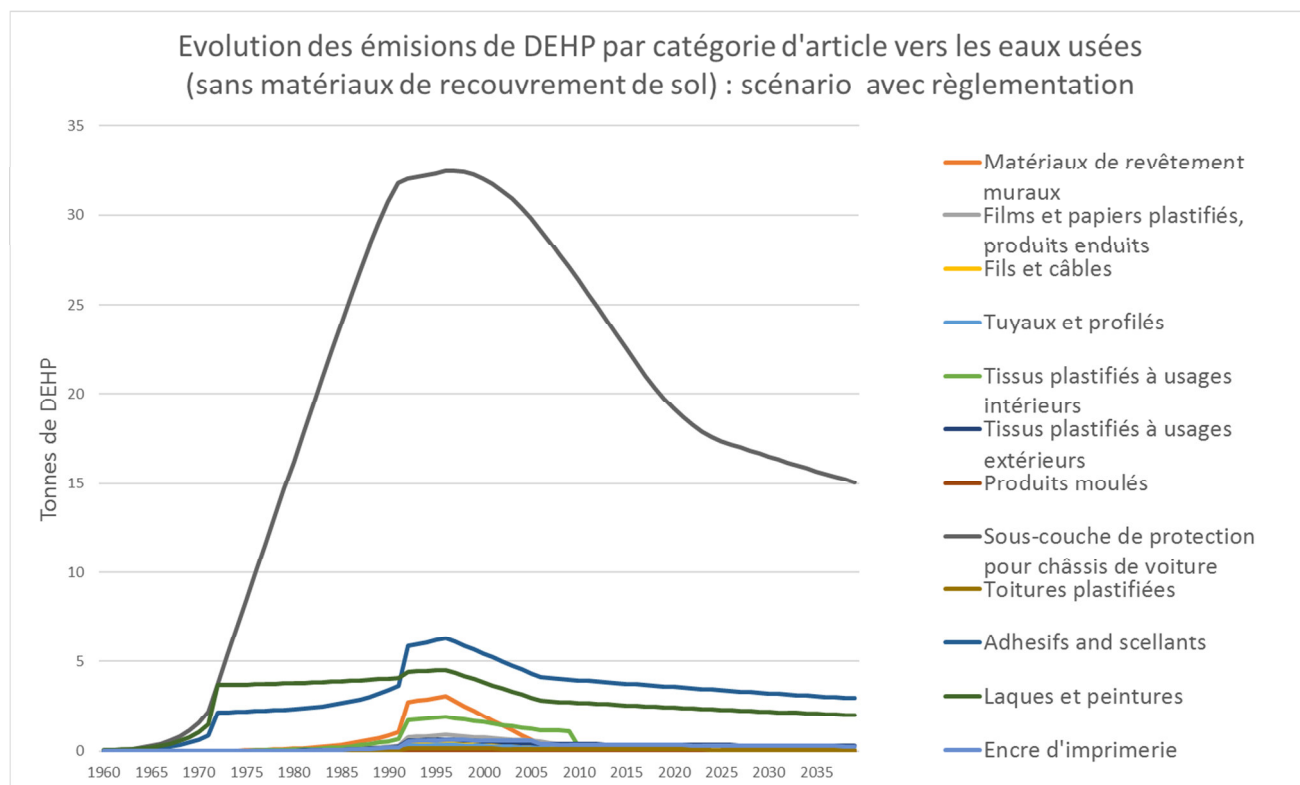


Figure 8 : Emissions de DEHP vers les eaux usées : scénario avec réglementation
(sans la catégorie matériaux de revêtement de sol)

Les Figure 9 et Figure 10 montrent la hiérarchie des émissions vers les eaux de surface en fonction des catégories d'objets. Pour ce compartiment les cinq catégories d'articles les plus émettrices de DEHP sont : les fils et câbles, les toitures plastifiées, les tissus plastifiés à usage extérieurs, les produits moulés et enfin les sous couches de protection pour châssis de voiture. Parmi ces cinq catégories d'articles seule la catégorie d'articles « produits moulés » serait prise en compte par la réglementation REACH. Il est donc logique qu'il y ait peu de variation entre les deux scénarios. Dans les deux scénarios, les catégories d'articles exclues du projet de réglementation REACH ont les mêmes projections de quantité entre 2020 et 2040, et donc logiquement les mêmes émissions vers l'environnement.

En ce qui concerne les émissions vers l'eau (eaux de surface et eaux usées) celles-ci sont en majeure parties dues à des catégories d'articles exclues de la réglementation REACH, comme par exemple les produits moulés pour les émissions vers les eaux de surface et les sous-couches de protection pour châssis de voiture pour les émissions vers les eaux usées.

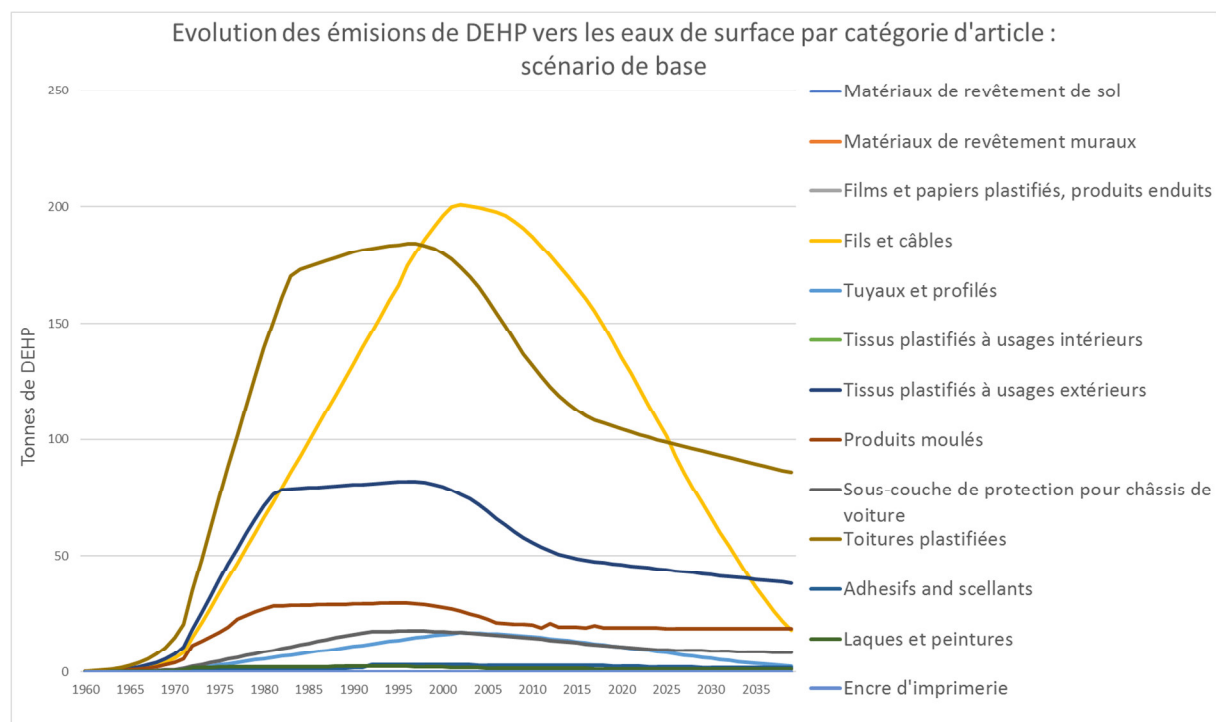


Figure 9 : Emissions de DEHP vers les eaux de surfaces par catégorie d'article :
scénario de base

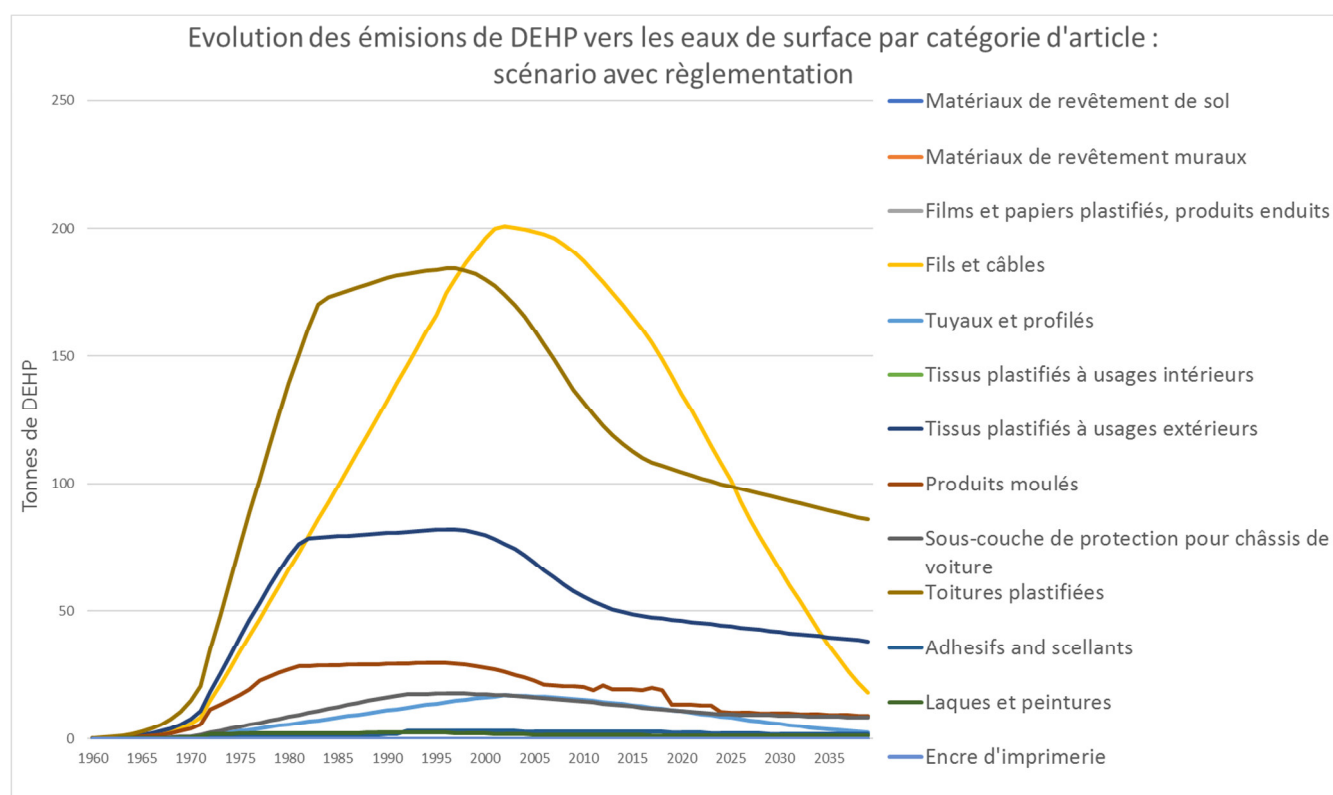


Figure 10 : Emissions de DEHP vers les eaux de surfaces par catégorie d'article :
scénario avec réglementation

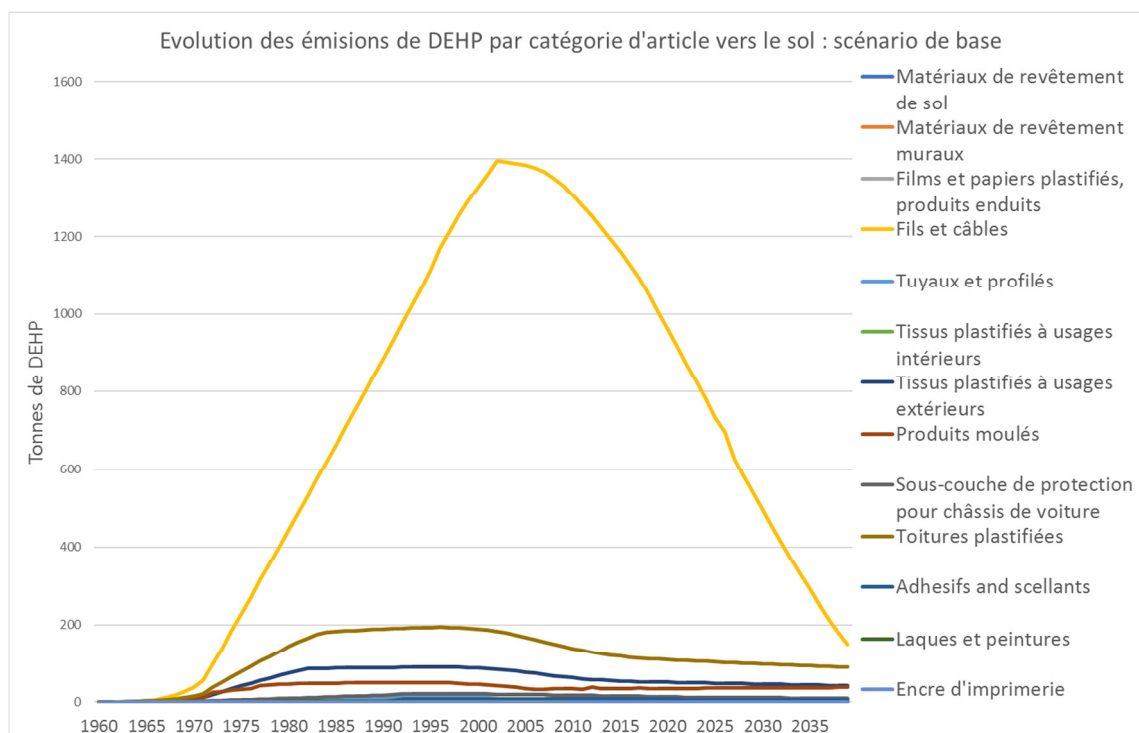


Figure 11 : Emissions de DEHP vers le sol par catégorie d'article : scénario de base

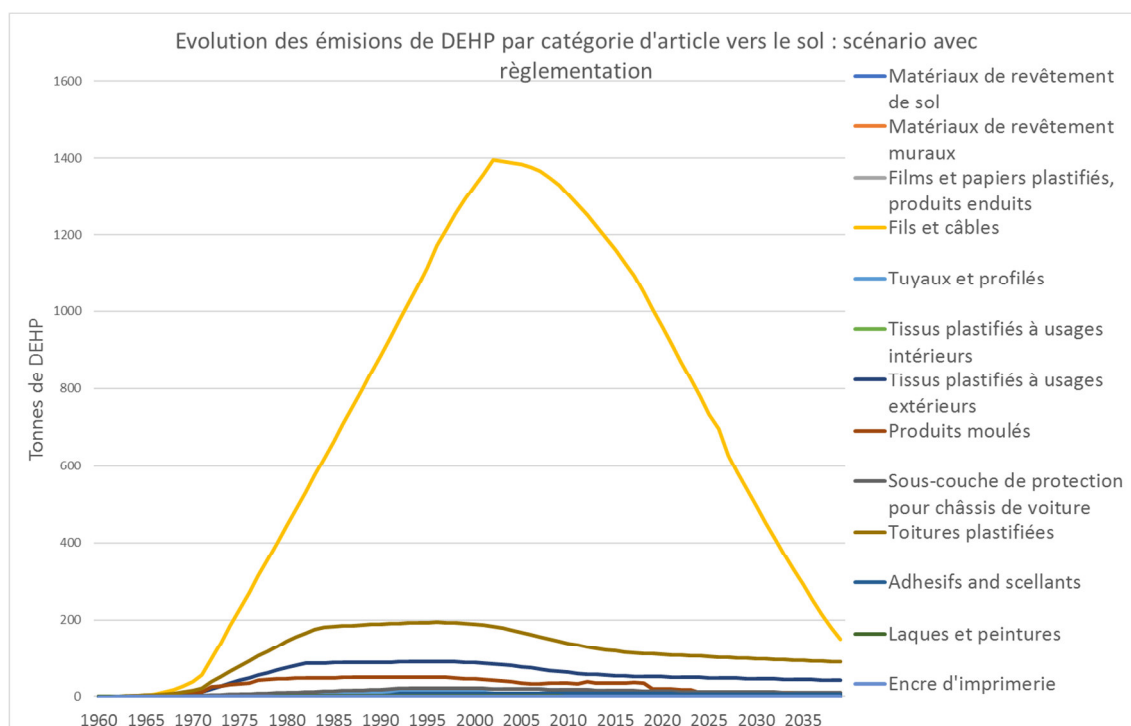


Figure 12 : Emissions de DEHP vers le sol par catégorie d'article : scénario avec réglementation

Les émissions vers le sol illustrées sur les Figure 11 et Figure 12 proviennent majoritairement de la catégorie d'article fils et câbles. Ce résultat est logique car une partie des câbles est utilisée de manière souterraine. Ensuite les catégories d'articles les plus émettrices sont les toitures plastifiées et les tissus plastiques extérieurs. Comme pour les émissions vers l'eau, les articles qui émettent le plus ne sont pas inclus dans la réglementation REACH.

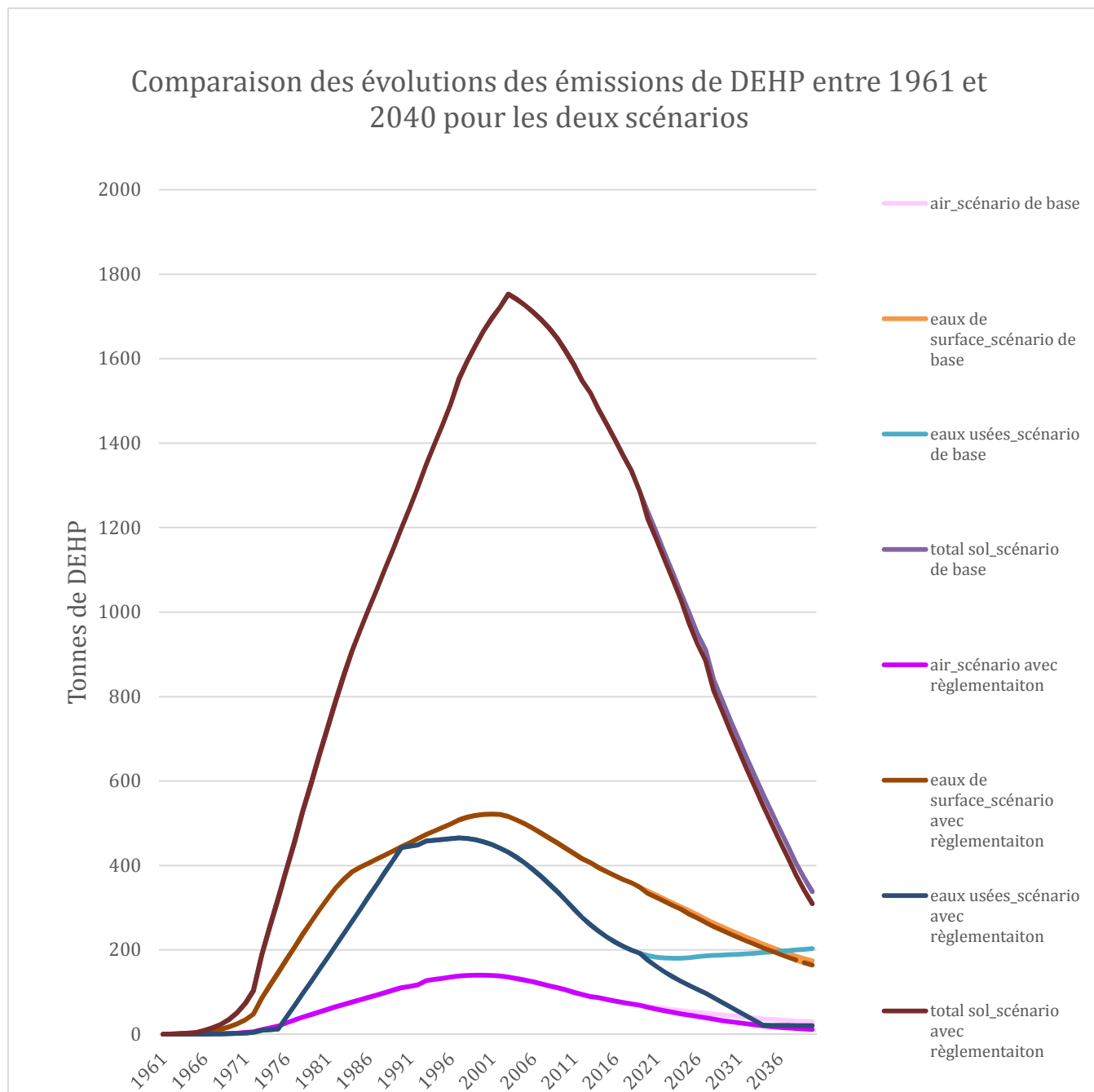


Figure 13 : Comparaison des émissions de DEHP dans l'environnement pour les compartiments air, sol, eaux de surfaces et eaux usées par année

La Figure 13 représente les émissions de DEHP en fonction des compartiments pour les deux scénarios : avec ou sans réglementation REACH. Les pics d'émissions des différents compartiments

d'émission se situent au début des années 2000. Sur ce graphique on remarque que la plus grande partie des émissions est vers le sol, loin devant les émissions vers les eaux de surface et les eaux usées.

La réglementation REACH aurait un effet significatif sur les émissions de DEHP dans l'environnement pour les différents milieux. En effet on peut observer sur la Figure 13 une diminution des émissions par rapport au scénario de base dès 2020.

Pour les émissions vers les eaux de surfaces par exemple, qui sont comprises entre 340 et 286 tonnes pour la période 2000-2010. Le pic d'émissions dans les deux scénarios est à 340 tonnes aux débuts des années 2000 (2000-2001). Dans le cas où la réglementation est appliquée les quantités émises passent de 227 tonnes en 2019 à 185 tonnes en 2025, à 155 tonnes en 2030 et à 107 tonnes en 2040. Contrairement au scénario de base où les émissions en 2025, 2030 et 2040 étaient respectivement de 191, 161 et 114 tonnes. La mise en place de la réglementation REACH a un effet significatif des émissions vers les eaux de surfaces.

Cette diminution est plus franche pour les émissions vers les eaux usées. Cette différence d'écart s'explique par le fait que les catégories d'articles les plus émetteurs vers les eaux de surface, le sol et l'air sont des articles ne sont pas inclus dans la réglementation REACH. Contrairement aux émissions vers les eaux usées, où les revêtements de sol, catégorie la plus émettrice, rentrent dans le cadre de la réglementation REACH.

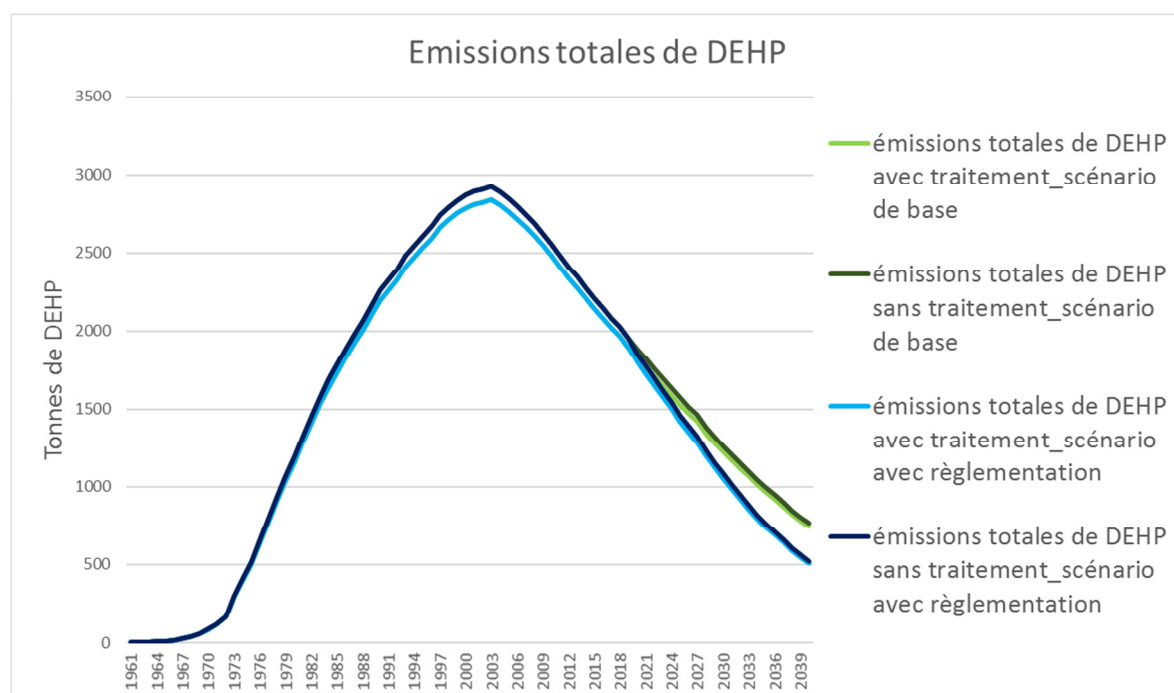


Figure 14 : Comparaison des émissions totales de DEHP en fonction des scénarios

Pour conclure si l'on compare les deux scénarios (Figure 14) en additionnant toutes les émissions de DEHP tous types de compartiments confondus, on pourrait observer un effet significatif de la réglementation sur les émissions de DEHP. En effet elles seraient réduites de 40% entre 2019 et 2040 contre 27% dans le cas où aucune mesure ne serait mise en place.

4 Conclusions et Discussions

4.1 Conclusions

Le DEHP est un produit qui est utilisé de manière importante depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Dans les années 1960, il représentait 80% des phtalates utilisés contre 30% au début des années 2000. Depuis le début du XXI^{ème} le marché du DEHP a une tendance à la baisse. En effet il a été classé comme substance de catégorie 2 pour la reproduction et le développement et sa substitution par d'autres molécules, influencée par le secteur industriel, est de plus en plus fréquente (INERIS, 2010). Les résultats de notre étude montrent qu'un pic d'émission de DEHP dans l'environnement a été atteint vers la fin des années 1990, coïncidant au moment où le stock d'objets contenant du DEHP était le plus important. Les stocks d'articles les plus importants en quantité de DEHP sont par ordre décroissant : les fils et les câbles, les tuyaux et profilés, les revêtements muraux et de sol et enfin les tissus plastiques.

Aujourd'hui, les émissions de DEHP ont diminué d'un peu moins d'un tiers par rapport à cette valeur maximale. Cependant même avec une décroissance des quantités mises sur le marché, les émissions de DEHP sur le bassin de la Seine décroissent lentement, cela étant dû en grande partie à l'inertie des stocks d'articles contenant du DEHP. La prise en compte du recyclage pourrait rendre cette décroissance d'émissions encore plus faible.

Concernant la réglementation ECHA, même si son effet mettra du temps à se produire pleinement, c'est-à-dire environ 15 ans (Figure 15), cette réglementation interdisant la production et la mise sur le marché de certains articles, a un effet significatif sur les émissions de DEHP vers l'environnement.

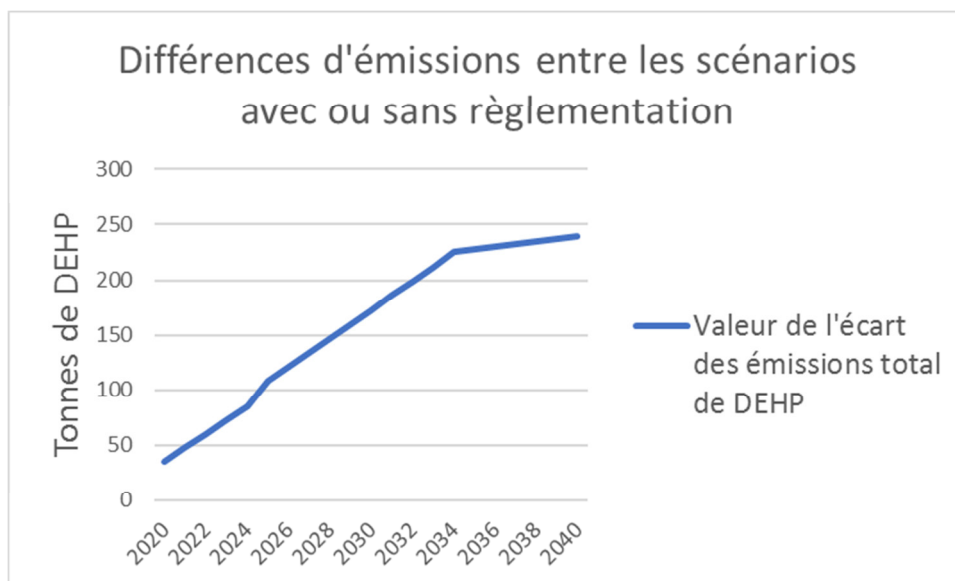


Figure 15 : Ecart entre les émissions de DEHP entre les scénarios avec ou sans réglementation

De plus on observe une hiérarchie des compartiments d'émissions : les émissions les plus importantes ont lieu vers le sol, puis vers les eaux de surface.

Dans la suite de ce rapport, les résultats obtenus à l'issue de cette étude sont comparés à d'autres résultats de travaux du projet PIREN-Seine.

4.2 Comparaison avec les résultats de précédents travaux dans le cadre du projet PIREN-Seine

Dans le cadre du projet de recherches PIREN-Seine, le rapport « bilans de flux de polluants organiques dans le bassin de la Seine » (Gasperi , Mouchel , & et al, 2016) a estimé des flux de polluants sur le bassin de la Seine et notamment des flux de DEHP. Ces estimations ont été faites à partir de mesures de concentrations dans des compartiments environnementaux et urbains. Elles suivent donc une méthode différente et complémentaire de notre travail qui part des usages du produit chimique.

En ce qui concerne les flux de DEHP vers le fleuve de la Seine, cet article présente les résultats suivants en kg pour l'année 2014 ¹¹ :

- environ $1.7 \cdot 10^3 (\pm 2.1 \cdot 10^3)$ vers la rivière (Seine) en amont du bassin de la Seine
- environ $6.9 \cdot 10^3 (\pm 6.5 \cdot 10^3)$ vers la rivière (Seine) en aval du bassin de la Seine
- environ $10.3 \cdot 10^3 (\pm 7.4 \cdot 10^3)$ vers la rivière (Seine) en aval du bassin de la Seine après les rejets des stations du SIAAP.

En ce qui concerne la quantité de DEHP émise vers les STEP les émissions sont de $59.5 \cdot 10^3 (\pm 27.0 \cdot 10^3)$ kg pour l'année 2014 (Gasperi , Mouchel , & et al, 2016). On peut considérer ce flux de DEHP comme un flux de polluants vers les « eaux usées », selon notre propre terminologie.

D'autre part les résultats obtenus dans le cadre de notre étude en se basant sur les articles contenant du DEHP sont de : $395 \cdot 10^3$ kg de DEHP émis vers les eaux de surfaces et de $244 \cdot 10^3$ kg pour les eaux usées en 2014, ainsi que $1479 \cdot 10^3$ kg vers le sol (sol urbain et sol).

Si l'on se réfère à la méthodologie du rapport « bilans de flux de polluants organiques dans le bassin de la Seine » (Gasperi , Mouchel , & et al, 2016) et notamment à la modélisation des flux de polluants sur le bassin de la Seine qui est adoptée, nous ne pouvons pas comparer la valeur des émissions de DEHP en aval du bassin de la Seine après les rejets de stations du SIAAP soit la valeur : $10.3 \cdot 10^3 (\pm 7.4 \cdot 10^3)$ kg à la somme des émissions vers le sol, les eaux usées et vers les eaux de surface de notre étude. Néanmoins il est possible de comparer le flux de DEHP émis vers les STEP de l'étude précédemment citée à la quantité de DEHP émises vers les eaux usées en 2014 de ce présent rapport. Soit la comparaison de $59.5 \cdot 10^3 (\pm 27.0 \cdot 10^3)$ kg à $244 \cdot 10^3$ kg. On remarque donc que la valeur obtenue dans notre étude est environ 4 fois supérieures à ces valeurs.

La différence entre ces résultats, compte-tenu des différences radicales de méthodes, et des nombreuses incertitudes du présent travail, peut être considérée comme faible.

Elle s'explique dans un premier temps par les différences méthodologiques de ces deux études. Du point de vue de notre travail, on peut expliquer cet écart par l'incertitude liée aux données utilisées pour comptabiliser les quantités de DEHP contenues dans les articles, produites et traitées ainsi qu'aux facteurs d'émissions utilisés. Sur ce point, la question de la transférabilité de ces valeurs établies à l'échelle de l'UE, à celle du bassin de la Seine, est également un élément clef des sources d'erreurs potentielles. Il doit également exister d'autres facteurs non pris en compte dans notre étude comme par exemple des facteurs de dégradation du DEHP, de ré évaporation, de pertes dans les sédiments et de migration d'un milieu à un autre. Ces facteurs qui sont inconnus de notre évaluation, sont intrinsèquement pris en compte dans l'autre étude (Gasperi , Mouchel , & et al, 2016) car celle-ci se base directement sur des mesures dans les milieux.

Cet écart de résultat pourrait s'expliquer également par certaines limites de la méthode employée qui sont présentées dans la partie suivante.

Malgré ces limites, la bonne concordance des ordres de grandeur est encourageante, et rend envisageable l'utilisation de prospective d'émissions réalisées dans le cadre de ce travail pour des

¹¹ Par rapport à notre étude ces flux sont considérés comme des flux vers les eaux de surfaces

études sur le devenir de la contamination par des micropolluants comme le DEHP dans le bassin de la Seine.

4.3 Limites et pistes exploratoires

Une des premières limites de notre méthode provient de l'appui pris sur des valeurs européennes pour calculer des émissions pour le bassin de la Seine. Un ratio de population a été utilisé pour passer d'une zone géographique donnée à une autre, comme expliqué dans la partie : « Données utilisées et hypothèses ». En utilisant cette méthode et ces données on suppose que les circuits de la production et la consommation en plastique souple sont uniformes en Europe.

Ensuite une des étapes qui devrait être améliorée en priorité dans cette estimation est le traitement de déchets contenant du DEHP. Pour cela, contrairement à l'application d'un facteur unique à tous les articles comme actuellement, il serait plus pertinent de pouvoir dissocier le type de traitement en fonction des types d'articles en y associant un facteur d'émission spécifique. C'est une piste d'amélioration à étudier pour la poursuite de ce travail, en commençant par examiner les données disponibles dans la littérature. Parmi les traitements possibles il existe la mise en décharge ou l'incinération mais il serait également intéressant d'y inclure le recyclage. Celui-ci pourrait avoir des effets sur la durée de vie des produits mais aussi sur les émissions dans l'environnement.

De plus pour plusieurs étapes du cycle de vie, notamment pour la production de DEHP, l'utilisation du DEHP par l'industrie et le traitement des articles en fin de vie contenant du DEHP (incinération, décharge...), il serait intéressant de s'appuyer sur des données spécifiques au bassin de la Seine, en essayant de comptabiliser exactement les zones de production et de traitement. Ainsi certaines estimations d'émissions de cette étude pourraient être en réalité plus faibles car se situant en dehors de la zone d'étude du bassin de la Seine ou inversement.

Bien que l'approche de ce travail, influencée par les données disponibles, se soit détachée des émissions exclusives du bassin de la Seine, ce travail suit d'une certaine façon à ce stade une logique d'empreinte environnementale des objets utilisés à l'intérieur du bassin de la Seine, en comptabilisant les émissions liées à leur production et leur fin de vie, même si celle-ci a lieu en dehors du bassin.

Pour estimer les émissions de DEHP liées à l'utilisation d'articles, une partie importante de ce travail a consisté à estimer les stocks de groupes d'articles contenant du DEHP dans le but de les associer ensuite à des facteurs d'émissions spécifiques. Les facteurs qui jouent sur le poids des stocks sont : la date de mise sur le marché de l'article, la durée de vie de l'article et la quantité d'articles mise sur le marché. Il serait intéressant de pouvoir s'appuyer sur des experts techniques pour connaître l'historique de l'utilisation du DEHP. Enfin la durée de vie des articles est un facteur fortement corrélé au volume d'un stock et donc à ses émissions. Elle a été fixée de façon uniforme sur de grands groupes d'articles, en reprenant des hypothèses publiées, mais qui semblent relativement mal documentées et c'est un facteur non négligeable d'incertitude.

La réglementation ECHA ne s'applique pas aux articles utilisés par l'industrie et l'agriculture. Faute d'information il a été considéré, à partir de 2011, que la quantité de DEHP contenue dans les catégories des groupes d'articles entrant dans la réglementation comme par exemple les revêtements de sol et murs ou les films plastiques, ne contenaient que des articles inclus dans la réglementation ECHA. En faisant cette hypothèse on exclut donc les plastiques de ces mêmes catégories aux articles à usage agricole ou industriel à partir de 2011¹². Ainsi en s'appuyant sur les données ECHA, les articles contenant DEHP et concernés par la réglementation ont été sous-estimés. Cela constitue une possible piste d'amélioration délicate mais réalisable en se basant sur les données Eurostat, des articles contenant du DEHP à usage industriel et agricole.

¹² A partir de 2011 la seule source de données disponibles, pour les quantités de DEHP, est la réglementation ECHA

L'ensemble des résultats est fortement influencé par l'hypothèse de décroissance annuelle de 1% de projection de quantités de DEHP pour les articles exclus de la réglementation ECHA, pour les années après 2011. En s'appuyant sur des données Eurostat, des prévisions plus fiables pourraient éventuellement être développées, ou différentes valeurs de décroissance pourraient être étudiées.

Bibliographie

- Cladière, Mathieu, Johnny Gasperi, Catherine Lorgeoux, Céline Bonhomme, Vincent Rocher, and Bruno Tassin. 2012. 'Alkylphenolic Compounds and Bisphenol A Contamination within a Heavily Urbanized Area: Case Study of Paris'. *Environmental Science and Pollution Research* 20 (5): 2973–83. doi:10.1007/s11356-012-1220-6.
- Dargnat, C., M. Blanchard, M. Chevreuil, and M. J. Teil. 2009. 'Occurrence of Phthalate Esters in the Seine River Estuary (France)'. *Hydrological Processes* 23 (8): 1192–1201. doi:10.1002/hyp.7245.
- Delmas, Magalie. 2011. *Origine Des Exports de Sédiments Fluviaux: Prise En Compte de L'hétérogénéité Spatiale Des Versants*. Paris 6. <http://www.theses.fr/2011PA066077>.
- Gasperi, J., C. Sebastian, V. Ruban, M. Delamain, S. Percot, L. Wiest, C. Mirande, et al. 2014. 'Micropollutants in Urban Stormwater: Occurrence, Concentrations, and Atmospheric Contributions for a Wide Range of Contaminants in Three French Catchments'. *Environmental Science and Pollution Research* 21 (8): 5267–81. doi:10.1007/s11356-013-2396-0.
- Gasperi, Johnny, C. Lorgeoux, R. Moilleron, M.-C. Gromaire, and Ghassan Chebbo. 2009. 'Settling Velocity Grading of Particle Bound PAHs: Case of Wet Weather Flows within Combined Sewer Systems'. *Journal of Environmental Engineering* 135 (11): 1155–1160.
- Gateuille, David, Olivier Evrard, Irène Lefevre, Elodie Moreau-Guigon, Fabrice Alliot, Marc Chevreuil, and Jean-Marie Mouchel. 2014. 'Mass Balance and Decontamination Times of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Rural Nested Catchments of an Early Industrialized Region (Seine River Basin, France)'. *Science of The Total Environment* 470–471: 608–17. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.10.009.
- Labadie, Pierre, and Marc Chevreuil. 2011. 'Partitioning Behaviour of Perfluorinated Alkyl Contaminants between Water, Sediment and Fish in the Orge River (Nearby Paris, France)'. *Environmental Pollution* 159 (2): 391–97. doi:10.1016/j.envpol.2010.10.039.
- Mailler, R., J. Gasperi, G. Chebbo, and V. Rocher. 2014. 'Priority and Emerging Pollutants in Sewage Sludge and Fate during Sludge Treatment'. *Waste Management* 34 (7): 1217–26. doi:10.1016/j.wasman.2014.03.028.
- Mailler, R., J. Gasperi, V. Rocher, S. Gilbert-Pawlik, D. Geara-Matta, R. Moilleron, and G. Chebbo. 2013. 'Biofiltration vs Conventional Activated Sludge Plants: What about Priority and Emerging Pollutants Removal?' *Environmental Science and Pollution Research* 21 (8): 5379–90. doi:10.1007/s11356-013-2388-0.
- Meybeck, Michel, Laurence Lestel, Philippe Bonté, Régis Moilleron, Jean Louis Colin, Olivier Rousselot, Daniel Hervé, Claire de Pontevès, Cécile Grosbois, and Daniel R. Thévenot. 2007. 'Historical Perspective of Heavy Metals Contamination (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) in the Seine River Basin (France) Following a DPSIR Approach (1950–2005)'. *Science of The Total Environment*, Human activity and material fluxes in a regional river basin: the Seine River watershedSeine Special Issue, 375 (1–3): 204–31. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.017.

- Motelay-Massei, A., D. Ollivon, B. Garban, M. J. Teil, M. Blanchard, and M. Chevreuil. 2004. 'Distribution and Spatial Trends of PAHs and PCBs in Soils in the Seine River Basin, France'. *Chemosphere* 55 (4): 555–65. doi:10.1016/chemosphere.2003.11.054.
- Muresan, B., C. Lorgeoux, J. Gasperi, and R. Moilleron. 2010. 'Fate and Spatial Variations of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Deposition within a Heavily Urbanized Area: Case of Paris (France)'. *Water Science & Technology* 62 (4): 822. doi:10.2166/wst.2010.931.
- Teil, Marie-Jeanne, Martine Blanchard, Cendrine Dargnat, Karen Larcher-Tiphagne, and Marc Chevreuil. 2007. 'Occurrence of Phthalate Diesters in Rivers of the Paris District (France)'. *Hydrological Processes* 21 (18): 2515–25. doi:10.1002/hyp.6484.
- Thévenot, Daniel R., Régis Moilleron, Laurence Lestel, Marie-Christine Gromaire, Vincent Rocher, Philippe Cambier, Philippe Bonté, Jean-Louis Colin, Claire de Pontevès, and Michel Meybeck. 2007. 'Critical Budget of Metal Sources and Pathways in the Seine River Basin (1994–2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn'. *Science of The Total Environment* 375 (1–3): 180–203. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.008.
- Tlili, Khawla. 2011. 'Contamination de L'environnement Francilien Par Les Ethers de Biphényle Polybromés (PBDE): Impact Sur La Qualité de L'atmosphère et Des Écosystèmes Aquatiques'.
- Tran, Bich Chau, Marie Jeanne Teil, Martine Blanchard, Fabrice Alliot, and Marc Chevreuil. 2015. 'BPA and Phthalate Fate in a Sewage Network and an Elementary River of France. Influence of Hydroclimatic Conditions'. *Chemosphere* 119: 43–51. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.04.036.
- Zgheib, Sally, Régis Moilleron, and Ghassan Chebbo. 2012. 'Priority Pollutants in Urban Stormwater: Part 1 – Case of Separate Storm Sewers'. *Water Research* 46 (20): 6683–92. doi:10.1016/j.watres.2011.12.012.