Estimation des flux de plastiques transitant en Seine : quelles méthodes pour quels résultats ?

Romain Tramoy, Johnny Gasperi, Rachid Dris, Laurent Colasse, C. Fisson, S
Sananes, Vincent Rocher, Bruno Tassin

► To cite this version:

Romain Tramoy, Johnny Gasperi, Rachid Dris, Laurent Colasse, C. Fisson, et al.. Estimation des flux de plastiques transitant en Seine : quelles méthodes pour quels résultats ?. Techniques Sciences Méthodes , 2019, 1-2, pp.15-26. 10.1051/tsm/201901015 . hal-02886804

HAL Id: hal-02886804

<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-02886804>

Submitted on 1 Jul 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Catégorie : Recherche appliquée ; Article scientifique/technique

Estimation des flux de plastiques transitant en Seine : quelles méthodes pour quels résultats ?

Plastic input from the Seine Basin to the Sea: what method for what results?

*R. TRAMOY¹, J. GASPERI¹, R. DRIS², L. COLASSE³, C. FISSON⁴, S. SANANES⁵, V. ROCHER⁶, B. TASSIN¹

¹LEESU (UMR MA 102, Université Paris-Est, AgroParisTech), Université Paris-Est Créteil, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex, France.

²Université de Bayreuth 95440, Bayreuth, Bavière, Allemagne

³Association SOS Mal de Seine, <http://maldeseine.free.fr/>

⁴GIP Seine-Aval, Pôle Régional des Savoirs ; 115 Bd de l'Europe, 76100 Rouen.

⁵Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Tour Séquoia, La Défense, 92400 Courbevoie.

⁶Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), Direction du Développement et de la Prospective, 82 Avenue Kléber, 92700 Colombes, France.

*Corresponding author

Mail : romain.tramoy@enpc.fr

Tel : [01 82 39 20 95](tel:0182392095) / [06.76.28.08.38](tel:0676280838)

Résumé

Des estimations globales établissent des flux de plastiques entrant en mer entre 1 et 10 millions de tonnes chaque année. Mais elles sont associées à de grandes incertitudes liées à des difficultés méthodologiques pour quantifier les flux de plastiques du continent vers les océans. Travailler à l'échelle des bassins versants s'avère nécessaire afin de mieux calibrer ces approches globales. Dans cette étude, une approche de modélisation conceptuelle, basée sur l'approche statistique de JAMBECK *et al.*, et une approche de terrain sont comparées avec pour objectif (i) de quantifier les flux de plastiques transitant en Seine et (ii) de préciser les incertitudes des deux approches et leur origine. Malgré la simplicité des approches statistiques et des techniques d'extrapolation utilisées, les deux méthodes donnent des résultats du même ordre de grandeur, i.e. entre 1 800 et 5 900 t/an de plastiques transitant en Seine. Les principaux acteurs de la gestion des déchets sauvages sur le fleuve ne collectent qu'environ 100 t/an de plastiques, soit une faible fraction du flux estimé. Dans le cadre de la DCSMM de 2008, des actions sont mises en œuvre afin de quantifier les flux de plastique déversés en mer. Parmi les différentes méthodes, une meilleure exploitation des données issues des collectes des associations pourrait être une aubaine, avec par exemple, la création d'une base de données nationale et homogène répertoriant les opérations de collecte.

Abstract

Global estimations state between 1 and 10 million metric tons of plastic entering the oceans each year. But, they are associated with great uncertainties due to methodological difficulties to accurately quantify plastic fluxes from continent into oceans. New studies at basin scale are thus needed to improve model calibrations. Here, a modelling approach based on JAMBECK's statistical method and a field approach are compared in order to (i) quantify plastic fluxes in the Seine River and (ii) constrain uncertainties and their origins of the both approaches. Despite the simplicity of the statistical approach and rough extrapolations, both methods yield similar results, i.e. between 1 800 and 5 900 t/yr of plastic flowing into the Seine River. Whereas about 100 t/yr of plastic litter are removed by involved NGOs, which is a small fraction of the estimated flux. According to the MSFD (2008), actions are undertaken to quantify plastic fluxes entering the oceans. Among different methods, a better use of the data from the waste collection by NGOs should be considered. The development of a national and homogenous platform listing all the collects could be a first step in that direction.

Mots clés (Français et Anglais)

Macro-déchet/Litter ; Bassin versant/Watershed ; Collecte de déchets/Waste collection ; Pollution/Pollution ; Rivière/River

Introduction

Depuis les années 1950, la production mondiale de plastique est passée de 1,7 à 335 millions de tonnes en 2016 [PLASTICSEUROPE, 2017]. Parallèlement, la présence de déchets plastiques dans les milieux naturels s'est accrue sur l'ensemble de la surface du globe, tant sur les continents que dans les océans. Paradoxalement, alors que des estimations statistiques à l'échelle mondiale évaluent les flux vers les océans entre 1 et 10 millions de tonnes annuellement, les stocks de plastiques à la surface des océans ne sont estimés qu'à quelques centaines de milliers de tonnes [ERIKSEN *et al.*, 2014; SEBILLE *et al.*, 2015; JAMBECK *et al.*, 2015; LEBRETON *et al.*, 2017; SCHMIDT *et al.*, 2017]. Bien que peu étudiés jusqu'à présent, les fonds océaniques pourraient constituer la destination finale des plastiques et rassembler la majeure partie des flux entrants [GALGANI *et al.*, 2000; KAMMANN *et al.*, 2018; MAES *et al.*, 2018]. Les stocks cumulés en centre d'enfouissement et dans la nature s'élèveraient quant à eux à 5 000 millions de tonnes sur les 8 000 millions de tonnes déjà produites [GEYER *et al.*, 2017]. Les déchets plastiques ne représentent que 8 à 15% en masse de l'ensemble des déchets générés par les activités humaines [HOORNWEG et BHADA-TATA, 2012], mais leur longévité (du siècle au millénaire) et leur propriétés physico-chimiques en font les déchets les plus présents dans les fonds marins ou les terres isolées (e.g. îles du Pacifique), loin de leur source de production, i.e. les zones urbaines et littorales où vivent la majorité de la population mondiale [BARNES *et al.*, 2009]. Par ailleurs, ils représentent une grave menace pour les écosystèmes, en particulier marins [BARNES *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2016]. Ces plastiques marins largement étudiés proviendraient majoritairement des continents par l'intermédiaire des fleuves et rivières [LI *et al.*, 2016]. La question du transfert des plastiques des milieux continentaux vers les océans est donc cruciale, d'autant plus qu'il paraît plus facile de les récupérer dans les rivières que dans les mers et océans tridimensionnels.

Plusieurs approches statistiques ont été développées ces dernières années pour mieux estimer les apports aux océans à l'échelle planétaire [JAMBECK *et al.*, 2015; LEBRETON *et al.*, 2017; SCHMIDT *et al.*, 2017]. Ces approches reposent toutefois sur quelques paramètres clés, estimés par des études locales peu nombreuses et aux incertitudes mal définies. L'estimation des flux de déchets à la mer pose un certain nombre de difficultés méthodologiques. De surcroît, même dans les régions connues pour une gestion des déchets solides peu efficiente, en particulier l'Asie du Sud-est, les fuites/pertes de plastiques dans l'environnement sont minimales par rapport à la production et à la consommation de plastiques qui se chiffre en centaines de millions de tonnes [PLASTICSEUROPE, 2017]. Ainsi, tous les modèles statistiques globaux se réfèrent à l'indicateur MMPW (Miss Managed Plastic Waste, JAMBECK *et al.*, 2015) pour estimer les flux de déchets plastiques entrant en mer. Cet indicateur correspond à la quantité de déchets plastiques mal gérés transférés dans l'environnement que ce soit par accident, par incivilité ou par une mauvaise gestion des déchets par les services compétents. Il est dépendant de la pression anthropique, du niveau économique de la zone considérée et d'un taux de fuite fixé de manière universelle à 2% qui rend compte des pertes accidentelles ou

volontaires. Ce dernier taux est particulièrement sujet à caution car s'il est appliqué partout il ne repose que sur une étude menée aux Etats-Unis [MSWCONSULTANTS, 2009; voir sup. data de JAMBECK *et al.*, 2015]. Etant par nature non quantifiable car ce sont des déchets non gérés, ce taux a été estimé par une seule étude, sur la base du ratio entre la quantité de déchets sauvages collectés aux USA (4,6 Mt) et la quantité totale de déchets traités par les filières classiques. Les calculs de flux de plastiques reposent donc sur des paramètres statistiques fragiles compte tenu de leur estimation à partir de travaux de terrain rares et régionalisés [LEBRETON *et al.*, 2017]. Ces estimations de flux globales sont toutefois d'une importance capitale car elles ont le mérite de proposer des ordres de grandeur. Mieux contraindre et identifier leurs limites est essentiel au développement d'une méthodologie robuste et standardisée pour la mesure de ces flux.

Bien que des études aient déjà fait état de la présence de macro- et microplastiques en zone urbaine et péri-urbaine du bassin de la Seine [GASPERI *et al.*, 2014; DRIS *et al.*, 2015], aucune n'a abouti à des estimations de flux vers l'océan. C'est l'objet de la présente étude. Le bassin de la Seine couvre 78 600 km² avec une forte pression anthropique. C'est un territoire dynamique en termes démographique, économique, agricole et commercial, concentrant 25% de la population, 50% du trafic fluvial, 40% de l'activité économique et 30% de l'activité agricole au niveau national [FISSON *et al.*, 2014; LEMOINE et VERNEY, 2015]. Le contraste saisonnier du réseau hydrographique est bien marqué par des régimes de crue durant l'hiver, et d'étiage durant l'été, se poursuivant en automne. L'exutoire du bassin est constitué d'un estuaire méandrique de 170 km de long dans lequel l'influence de la marée et des vents augmente à mesure que l'on se rapproche de l'embouchure. Tous ces éléments conduisent à une grande variabilité spatiale et temporelle des flux de déchets plastiques.

Compte tenu des faibles débits de la Seine (350 m³/s en moyenne à Austerlitz) et de la forte population (16,7 millions d'habitants), la pression anthropique sur le fleuve est importante et visible, ce qui amène l'état, et l'ensemble de ses gestionnaires à se mobiliser pour une meilleure connaissance de la pollution par les plastiques sur ce bassin. Le bassin de la Seine constitue un site exemplaire pour développer une méthodologie qui permettrait d'estimer des flux de déchets plastiques vers la mer via les grands fleuves.

Les flux de plastiques transitant en Seine sont estimés par deux approches distinctes : une approche de modélisation conceptuelle et une approche expérimentale de terrain. La première repose sur l'approche statistique de JAMBECK *et al.* [2015] décrite précédemment avec des données propres au bassin de la Seine en termes de population, production de déchets et taux de plastiques associé. La seconde approche consiste à estimer des flux de déchets plastiques par extrapolation des quantités de déchets captés par les barrages flottants du SIAAP, le service public de l'assainissement francilien. Les deux méthodes sont discutées en termes de robustesse et de sensibilité afin d'estimer au mieux leurs incertitudes, et notamment celles des paramètres qu'elles intègrent. Enfin, l'impact des nettoyages des berges de rivière sur la pollution plastique dans l'environnement est évoqué. Les données de collectes, en particulier des associations, sont en effet sous-exploitées et appellent à un regain d'intérêt pour évaluer les niveaux de pollution des cours d'eau en général et de la Seine en particulier.

1. L'approche de modélisation conceptuelle

1.1 Extraction des données statistiques nécessaires

Appliquée au bassin de la Seine, l'approche de modélisation conceptuelle repose sur les paramètres suivants : (i) le nombre d'habitants dans le bassin, (ii) la quantité annuelle de déchets produite par habitant, (iii) le taux moyen de plastiques contenu dans les déchets produits (iv) un taux de fuite des déchets vers l'environnement. Le modèle conceptuel est décrit dans la *figure 1A*. Dans la méthode originelle, il est également fait référence à la proportion de déchets ménagers mal gérés par les systèmes de collecte (e.g. décharges à ciel ouvert, défaut de collecte, etc.). Cette proportion est calculée sur la base du PIB de la zone considérée en admettant que les pays à fort PIB ont un système de collecte performant, et tendent vers 0% de déchets mal gérés, et inversement pour les pays aux revenus les plus bas [HOORNWEG et BHADA-TATA, 2012; sup. data JAMBECK *et al.*, 2015]. Compte tenu de son mode d'estimation, la proportion de déchets mal gérés par les systèmes de collecte en France est considérée comme nulle. Par conséquent, seuls les déchets plastiques sauvages, en dehors des systèmes de collecte ont été considérés dans cette étude ; d'après JAMBECK *et al.* [2015], entre 15 et 40% de ces déchets sauvages rejoignent la mer via le réseau hydrographique.

Les données sur les quantités d'Ordures Ménagères Résiduelles (OMR) – la fraction des déchets non triés à la source – produites annuellement par habitant et par département sont tirées du site dédié de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie [ADEME ; http://carto.sinoe.org/carto/enquete_collecte/flash/#]. C'est une carte SIG interactive d'où les données de population ont également pu être extraites pour les départements intégralement inclus dans le bassin. Pour les autres départements partiellement inclus dans le bassin de la Seine, la population a été calculée à l'aide du logiciel QGIS en croisant population, limites du bassin versant et limites des départements. Les couches utilisées sont : (i) GEOFLA® 2016 v2.2 Communes France Métropolitaine (IGN), (ii) IGN GEOFLA® Départements et (iii) une couche présentant les limites du bassin versant de la Seine. Les départements partiellement inclus dans le bassin sont l'Aisne, les Ardennes, l'Aube, l'Eure, le Calvados, la Côte d'Or, l'Eure et Loire, le Loiret, la Marne, la Haute Marne, la Meuse, la Nièvre, l'Oise, l'Orne, la Seine Maritime et l'Yonne.

A. Modèle conceptuel

B. Résultats

En italique, la source des données d'entrée. Les encadrés rouges marquent la robustesse des données : plus le rouge est intense, moins les données en sorties sont robustes. MMPW, Miss Managed Plastic Waste, déchets plastiques mal gérés.

Figure 1 : Modèle conceptuel de la méthode inspirée de Jambeck et al. [2015] et adaptée au bassin de la Seine.

Dans cette étude, seules les OMR ont été considérées, car elles sont très bien caractérisées dans les rapports de l'Observatoire Régional des Déchets d'Ile de France (ORDIF) en terme de typologie et de quantité [ORDIF, 2017a, 2017b], notamment en ce qui concerne leur taux de plastiques. Ce n'est pas le cas des déchets issus des collectes séparées, souvent appelées « poubelles jaunes » qui n'ont pas fait l'objet d'une telle caractérisation. Elles ne représentent par ailleurs en île de France que 10% à 20% de la quantité d'OMR [ADEME ; http://carto.sinoe.org/carto/enquete_collecte/flash/#]. Compte tenu des connaissances approfondies sur les OMR, ces dernières permettent de prendre en compte les spécificités des déchets dans le bassin de la Seine, tout en s'assurant d'une certaine homogénéité entre les données de production des déchets et le taux de plastiques associé. *In fine*, l'ensemble de ces données a permis de calculer une production annuelle moyenne d'OMR par habitant et par département, pondérée par leur population. Au contraire, JAMBECK et al. [2015] ont choisi de considérer l'ensemble des déchets produits et un taux de plastiques associé tiré de la banque mondiale (10%) dans le même souci d'homogénéité. La compilation de données concernant plus de 7,8 millions d'habitants d'Ile de France a permis d'établir un taux de plastiques dans les OMR de 16% [ORDIF, 2017a]. Ce taux a été appliqué sur l'ensemble du bassin. Enfin, le taux de fuite de 2% utilisé par JAMBECK et al. [2015] a été utilisé pour calculer les pertes de déchets dans l'environnement car, à l'heure actuelle, il n'existe pas de meilleur indicateur. Pour les mêmes raisons, les 15 à 40% des déchets atteignant les hydrosystèmes ont été conservés pour les calculs.

1.2 Résultats en Seine

Le bassin de la Seine comprend le quart de la population hexagonale avec ses 16,7 millions d'habitants, dont 12 millions sont concentrés en île de France. La production d'OMR est de 276 kg/hab/an en moyenne à l'échelle du bassin avec quelques disparités entre les départements. Cette quantité d'OMR par habitant en île de France est supérieure de 17% à celle des autres départements du bassin de la Seine, voire de 45% à Paris. En effet, l'île de France et tout particulièrement Paris concentrent activités économique et touristique, associées à des modes de consommation nomades. Ces activités génèrent plus de déchets entraînant potentiellement des pertes plus importantes dans l'environnement, notamment des emballages [ORDIF, 2017a, 2017b]. L'analyse du rapport de l'ORDIF [2017a] sur la caractérisation des OMR franciliennes apporte quelques précisions sur les disparités entre territoires ruraux et grandes agglomérations. Le rapport compare la typologie des ordures ménagères franciliennes avec les moyennes nationales. Les résultats montrent une plus faible proportion des déchets verts dans les OMR franciliennes par rapport à la moyenne nationale. En revanche, la proportion d'emballages plastiques (16%) – dominés par les films et bouteilles – et de cartons d'emballage y est supérieure à la moyenne nationale [10% ; HOORNWEG et BHADA-TATA, 2012]. Par ailleurs le manque de place dans les zones densément peuplées ne permet pas un tri à la source efficace, ce qui contribue à renforcer la quantité d'OMR produites tout en réduisant le gisement de matières recyclables. Enfin, le nombre de déchèteries est considérablement plus faible dans ces zones, ce qui contribue d'autant à réorienter les déchets vers les OMR.

Sur la base de ces données, le model conceptuel conduit à des estimations de flux de déchets plastiques (MMPW) vers l'environnement de plus de 14 760 t/an dont 15 à 40%, soit 2 200 à 5 900 t/an, transitant en Seine (*Figure 1B*). Par ailleurs, si l'on ajoutait les déchets issus de la collecte sélective, en admettant qu'ils soient à 100% composés de plastiques, alors ces estimations seraient 10% à 20% plus élevées. A titre de comparaison, LEBRETON *et al.* [2017] dans leur étude globale basée sur la production de déchets sauvages par bassins versants, ont abouti à des estimations de ~ 20 000 t/an de MMPW pour le bassin de la Seine. Par ailleurs, les données d'entrée étaient sensiblement différentes car ils ont considéré l'ensemble des déchets produits (~550 kg/hab/an) avec un taux de plastiques moyen à l'échelle nationale de 10% tiré de l'étude de la banque mondiale de 2012 [HOORNWEG et BHADA-TATA, 2012]. Par contre, d'après leur modèle de calcul des flux à la mer, basé sur les MMPW du bassin et le ruissellement, seules 9 à 45 t/an iraient finalement en mer. Le choix des données d'entrée puis des modèles, comme illustré par LEBRETON *et al.* (2017) ou par la (non) prise en compte des déchets issus de la collecte sélective, influence donc de manière très importante les estimations de flux de plastique.

Les incertitudes sur les résultats de la modélisation conceptuelle sont issues de l'intervalle 15-40% des déchets sauvages qui atteignent le réseau hydrographique [JAMBECK *et al.*, 2015]. Toutefois, ces chiffres ne sont que peu documentés et dépendent de nombreux facteurs environnementaux ou des pratiques locales (nettoyages des rues, opérations de collectes citoyennes, dispositif de dépollution des eaux, civisme, etc.). Les mêmes remarques peuvent être appliquées au taux de fuite de 2% estimé dans la société Etats-Unienne et à la base des quantifications de flux. Les estimations sont en effet directement proportionnelles à ce taux. Or, rien ne permet d'exporter ce taux partout dans le monde

tant les pratiques culturelles sont différentes. Affiner ces paramètres à l'échelle du bassin de la Seine, sous réserve que cela soit possible, pourrait contribuer à réduire les incertitudes.

2. L'approche expérimentale

2.1. Méthodes d'extrapolation

L'approche expérimentale repose sur les quantités de déchets piégés par les 26 barrages flottants du SIAAP disposés sur 77 km de linéaire de la Seine et de la Marne, en amont et en aval de Paris (*Figure 2*). La quantité de déchets plastiques piégés dans les barrages est issue de l'étude détaillée de 10 d'entre eux [GASPERI *et al.*, 2014]. Elle rapporte que les barrages flottants piègent en moyenne 27 t/an de plastiques sur la période 2008-2013. A ce jour, la fraction piégée par ces barrages flottants par rapport au flux total n'est pas connue. Diverses extrapolations peuvent être réalisées, en considérant que les déchets plastiques sont uniformément répartis sur toute la section mouillée de la Seine. A partir de cette hypothèse, les quantités de déchets piégées ont été extrapolées en fonction d'un ratio de débit ou d'un ratio de dimension entre les barrages et la Seine. Le ratio de débit R_Q est le ratio entre les débits traités par l'ensemble des barrages et le débit moyen de la Seine. Le ratio de dimension R_D est le ratio entre les dimensions moyennes de la section d'un barrage (7,5 m de large sur 0,3 m de profondeur) et les dimensions moyennes d'une section de Seine dans l'agglomération parisienne (150 m * 3 m).

Il est considéré que chaque barrage capte une section de 2,25 m² de Seine avec une vitesse d'écoulement de 0,1 m/s. Par conséquent, chacun des 26 barrages capte un débit de 0,225 m³/s, soit 5,2 m³/s pour les 26 barrages.

Dans la méthode du ratio de débit, les barrages flottants captent donc en moyenne une fraction du débit de la Seine $R_Q \sim 1/67^e$ du débit moyen (350 m³/s, à Austerlitz). Sur cette base et celle des données du SIAAP, il a été possible de recalculer la concentration moyenne mensuelle de plastique $[Pl]_{mensuel}$ (mg/m³) :

$$[Pl]_{mensuel} = \frac{M_{Pl}}{Q_{mensuel} \times R_Q \times t_{(mois)}} \quad \text{Eq (1)}$$

Avec M_{Pl} la masse de plastique en mg, $Q_{mensuel}$ les débits moyens mensuels en m³/s, R_Q le ratio entre les débits traités par les 26 barrages et le débit moyen de la Seine (sans unité) et $t_{(mois)}$ le nombre de secondes dans un mois.

Dans la méthode du ratio de dimension, il existe un rapport moyen de 1/20 pour la largeur du barrage par rapport à la largeur de la Seine et de 1/10 pour la profondeur du barrage par rapport à la profondeur de la Seine, soit un ratio R_D de 1/200.

Figure 2 : (a) Le réseau de barrages flottants du SIAAP dans l'agglomération parisienne, (b) photo d'un barrage flottant et (c) exemple d'une collecte de déchets issue d'un des barrages [GASPERI *et al.*, 2014].

2.2 Résultats en Seine

Le flux de plastique total transitant en Seine peut être estimé par la méthode du ratio de débit à $67 * 27$ t/an, soit $\sim 1\,800$ t/an, et par la méthode du ratio de dimension à $5\,400$ t/an. Ces deux méthodes prennent en compte des apports entre les barrages puisque le tonnage total des 26 barrages répartis sur l'ensemble de l'agglomération parisienne est considéré. Elles se justifient par le fait qu'il n'existe pas d'évolution des quantités de plastique piégées entre l'amont et l'aval de Paris d'après l'examen des rapports d'activité du SIAAP. Cela suggère des apports constants dans l'ensemble du secteur couvert par les barrages, en cohérence avec une forte et constante pression anthropique de l'agglomération parisienne (Figure 2).

Les incertitudes de cette approche sont issues des deux modes d'extrapolation (ratio de débit *versus* ratio de dimension) et conduisent à des flux de plastique compris entre $1\,800$ à $5\,400$ t/an. Dans les deux cas, l'hypothèse forte est de considérer une homogénéité verticale et horizontale dans la distribution des déchets plastique comme pour les microplastiques [DRIS *et al.*, 2015], mais également, un apport et un écoulement en Seine constants tout au long de l'année. De plus, le positionnement des barrages flottants n'est pas relatif à des attributs du fleuve susceptibles de concentrer les macro-déchets (e.g. les méandres). Il n'est pas non plus aléatoire. Les barrages flottants sont en effet souvent situés à l'aval direct de déversoirs d'orages susceptibles de déverser des macro-déchets en nombre [GASPERI *et al.*, 2014].

D'autres facteurs peuvent influencer l'efficacité des barrages flottants et donc l'estimation des flux. Bien que l'efficacité de piégeage de ces derniers ne soit pas connue, force est de constater que le

283 trafic fluvial intense le long de la Seine ramène les déchets vers les berges. Cela concourrait à
284 augmenter l'efficacité de piégeage des barrages et donc à surestimer le flux global. Les méandres de
285 la Seine et les courants hélicoïdaux qu'ils engendrent contribuent également à ramener les déchets
286 flottants en direction des berges extérieures du méandre augmentant ainsi leur chance de piégeage.
287 En revanche durant les épisodes de crue, et l'inondation du lit majeur du cours d'eau, les chances de
288 piégeage par les barrages flottants diminuent, alors que le flux potentiel de plastique augmente comme
289 en atteste la crue de 2018 (*Figure 3*). Les déchets éventuellement déposés sur les berges et au-delà
290 dans les zones inondées ont en effet été remobilisés souillant les communes riveraines de la Seine,
291 particulièrement dans la zone entre l'amont de l'estuaire et l'aval de l'agglomération Parisienne (cf. les
292 communes de Méricourt et des Andelys en 2018).

294 **Figure 3 : Déchets de crue. Route de Muids, rive droite, aval des Andelys, le 15/02/2018. ©R.**
295 **Tramoy**

297 Ces remarques soulignent le besoin de mieux mesurer l'efficacité de piégeage des barrages
298 flottants, mais aussi de mesurer de manière indépendante une charge de déchets dans la colonne
299 d'eau. Des balises GPS flottantes ou des déchets marqués pourraient apporter des éléments de
300 réponse quant à l'efficacité des barrages en déterminant des probabilités de piégeage. D'autres
301 dispositifs, comme des filets immergés pourraient quant à eux renseigner les flux de plastique dans la
302 colonne d'eau qui peut être conséquent [MORRITT *et al.*, 2014].

303 Malgré les limites inhérentes aux barrages flottants, des valeurs de concentration en plastique
304 dans les eaux captées par ces derniers ont pu être calculées d'après l'équation (1). Elles varient de 63
305 à 493 mg/m³. En mer, dans les zones les plus contaminées, c'est-à-dire le gyre du pacifique nord ou la
306 méditerranée, les concentrations de plastiques sont de l'ordre de 1 à 2 mg/m³ en considérant les 30
307 premiers centimètres d'eau [COZAR *et al.*, 2014; COZAR *et al.*, 2015]. La pollution plastique serait donc
308 30 à 500 fois plus concentrée en Seine que dans les zones marines les plus polluées qui font pourtant
309 l'objet de projets de nettoyage (e.g. Fondation Ocean Clean Up).

Chaque point correspond à une moyenne mensuelle de débit et de concentration ($\log^{10}$) de plastique sur cette période. Les concentrations de plastique ont été calculées sur la base des quantités de déchets captés par les barrages, le taux moyen de plastique dans ces déchets, i.e 1,4% [GASPERI et al. 2014] et un ratio entre les débits traités par les barrages et le débit moyen de la Seine (1/67). Le point à 1 006 m^3/s correspond à la crue de juin 2016. La relation explique 52% de la variance (r^2), mais le caractère très significatif (> 99,9% de confiance) de cette relation est exprimé par la « p-value » de la régression linéaire (corrélacion de Pearson).

Figure 4 : Concentrations ($\log^{10}$) de plastique en fonction du débit mensuel moyen capté par les 26 barrages du SIAAP sur la période 2007-2017.

Les relations concentration-débit renseignent sur l'origine et les mécanismes de la pollution des rivières, que ce soit pour les matières en suspension, les nutriments ou les métaux [WILLIAMS, 1989; VINK et al., 1999; QUILBÉ et al., 2006]. Par analogie, la relation significative ($p < 0,001$) entre le log des concentrations de plastiques piégés dans les barrages flottants et les débits correspondants montre une dilution de la pollution plastique avec l'augmentation des débits (Figure 4). Les facteurs affectant les concentrations de plastiques dans les barrages sont nombreux comme en témoigne la forte variabilité des concentrations intra- et inter-saisonnière (été/hiver). En outre, près de la moitié de la variabilité est non expliquée par cette relation. Cela peut s'expliquer par l'expression d'une pollution plastique événementielle, c'est-à-dire par temps de pluie, couplée à une pollution continue, par temps sec, issue de l'agglomération parisienne. Les fuites dans l'environnement à travers les incivilités ou les pertes involontaires constitueraient un flux relativement constant, dilué par des débits croissants et amenant à une réduction des concentrations. Par ailleurs, l'été est propice à la consommation nomade près des berges. Les orages favorisent le transfert par ruissellement des déchets sauvages dans le milieu aquatique à partir de ces berges, d'où une pollution événementielle liée au temps de pluie. Cela

pourrait également expliquer l'étendue de la plage des valeurs de concentration de plastiques deux fois plus grande en été que celle observée en hiver (*Figure 4*).

3. Discussion

Les différentes approches conduisent à des estimations comprises entre 1 800 et 5 900 t/an de plastiques transitant en Seine. Cela représente entre 107 et 353 g/hab/an. Les incertitudes liées à l'une ou l'autre méthode ont pu être identifiées, mais n'ont malheureusement pas pu être précisées de manière satisfaisante. En revanche, les deux méthodes convergent vers des ordres de grandeur similaires, alors que l'origine de leurs incertitudes est très différente. L'ensemble des avantages et des inconvénients de chacune des méthodes est repris dans la *figure 5*. En résumé, l'approche de modélisation conceptuelle a l'avantage d'être systématique, facile à appliquer, mais elle est par conséquent un peu abstraite, et repose sur des hypothèses quasiment invérifiables (e.g. taux de fuite de 2%). Au contraire, l'approche de terrain, basée sur les barrages flottants repose sur des quantités de déchets plastiques collectées très concrètes. Mais elle représente des échelles de temps et d'espace limitées car les barrages sont concentrés dans l'agglomération parisienne et leur efficacité peut être très variable.

Figure 5 : Flux estimés transitant en Seine à travers une approche de modélisation conceptuelle et une approche expérimentale. Les intérêts et les limites de chaque méthode sont décrits.

A ce jour, très peu d'études donnent des ordres de grandeurs de flux de plastiques issus des rivières. Quand elles existent, elles sont souvent difficilement comparables entre elles pour des raisons méthodologiques. Par exemple, les estimations de flux de plastique dans le Danube sont bien moindres que celles estimées en Seine avec seulement 17 g/hab/an [LECHNER *et al.*, 2014]. Mais elles sont basées sur des extrapolations de quantité piégées dans des filets à larves de poisson (mailles 500 µm) qui n'ont pas permis de capter des macro-déchets. Or, les macro-plastiques, bien que représentant moins de 10% des plastiques en nombre, concentrent en masse la majeure partie du plastique dans les océans [ERIKSEN *et al.*, 2014]. A l'inverse, ce sont entre 350 et 7 270 g/hab/an de débris plastiques (>

2 cm) qui ont été estimés pour le Nhieu Loc – Thi Nghe, un canal se déversant dans le fleuve Saïgon au Vietnam [LAHENS *et al.*, 2018]. Les auteurs estiment un flux médian à 1 620 g/hab/an. A niveaux économiques similaires, les flux de plastique estimés dans les grands lacs aux Etats Unis sont eux très proches de ceux estimés pour la Seine avec 10 000 t/an pour ~ 90 millions d'habitants, soit 111 g/hab/an [HOFFMAN et HITTINGER, 2017]. L'origine des flux est largement liée aux grandes agglomérations riveraines des grands lacs que sont Chicago, Détroit, Toronto ou encore Cleveland. La convergence des flux estimés pour les grands lacs et pour la Seine n'est en revanche pas très surprenante car les auteurs ont également utilisé l'approche de JAMBECK *et al.* [2015] pour estimer des quantités de plastique. Cela pointe la nécessité de diversifier les méthodes, comme dans la présente étude, pour estimer les flux sous peine d'inter-validation entre les différentes études.

4. L'impact des nettoyages

La pollution des berges par les macro-déchets a de particulier le fait qu'elle est visible, surtout en période hivernale en absence de végétation. Ce « désordre environnemental » tend à éveiller les consciences. L'influence des citoyens a pour conséquence la mise en place de mesures pour collecter ces déchets *via* différentes structures : publiques (bateaux nettoyeurs dans les Hauts-de-Seine, barrages flottants du SIAAP), privées à but non lucratif (Naturaulin dans l'estuaire de la Seine) ou associatives (La-Seine-en-Partage, OSE, SOS Mal de Seine, fédérations de chasseurs). D'autres acteurs privés, comme les centrales hydroélectriques, captent également une partie du flux de déchets par nécessité technique, *i.e.* protéger les turbines de la présence de déchets qui pourraient les endommager. Bien que la liste des opérations de nettoyage ne soit pas exhaustive, la compilation et l'uniformisation des données recueillies montrent que ces acteurs retirent environ 100 t/an de plastique sur l'ensemble du fleuve. Cette estimation se heurte cependant à des difficultés méthodologiques importantes car les données récupérées diffèrent par leur format ou les types de nettoyage divergent entre acteurs. Par exemple, les centrales électriques au fil de l'eau externalisent le traitement des déchets qui est facturé au nombre de bennes sans qu'aucune caractérisation ne soit effectuée sur les déchets collectés. Ces problèmes de cohérences dans les données sont régulièrement pointés du doigt depuis que la thématique macro-déchets a émergé il y a une vingtaine d'année en France et notamment en PACA [LEROND, 1997; POITOU, 2003; GALGANI *et al.*, 2010].

Convertir des volumes de déchets totaux (avec déchets verts) en masse de plastique ou bien recueillir des données déjà transformées, sans la méthodologie associée (*Tableau I*), ne facilitent pas l'estimation de l'impact des nettoyages. Ce chiffre d'environ 100 t/an est sans doute à considérer avec précaution, mais il est quasi négligeable au regard des estimations de flux précédentes en ne représentant que 1 à 6 % du flux global estimé par ailleurs. Toutefois, un tel taux de captage est cohérent avec un taux de captage des déchets plastiques à l'échelle mondiale. La compilation d'un grand nombre de données de collectes de déchets sur les plages dans 130 pays montre que 250 000 tonnes de déchets ont été collectés à l'échelle mondiale [SCHNEIDER *et al.*, 2018]. En considérant que l'effort de collecte ait au minimum la même intensité chaque année et que l'ensemble des déchets collectés soit du plastique, le taux de collecte des déchets plastiques entrant dans les océans serait de 2,5 à 25 %

des 1 à 10 millions de tonnes estimées rejoignant les océans [JAMBECK *et al.*, 2015; LEBRETON *et al.*, 2017; SCHMIDT *et al.*, 2017]. Bien qu'utile d'un point de vu sociétal et environnemental, ces opérations de nettoyage, ne seraient donc pas en mesure à elles seules de résoudre le problème des déchets plastiques dans les océans où ils s'accumulent [SCHNEIDER *et al.*, 2018]. En outre, elles traitent pour la plupart des stocks, parfois anciens, et non des flux qui atteignent réellement la mer. D'autant plus que des événements extrêmes peuvent remobiliser des stocks. Malgré ces difficultés, les associations ou les groupes citoyens de collectes génèrent de nombreuses données qu'il serait judicieux d'exploiter pour évaluer des flux, ou *a minima* pour mettre en place un indicateur du taux de pollution des fleuves en macro-déchets. Elles permettent déjà de mettre en évidence de manière qualitative le rôle majeur des crues, des grandes marées et des événements pluvieux (Naturaulin, com. Pers.), en concordance avec les modèles qui prédisent le maximum des apports de plastique durant l'hiver sous nos latitudes [LEBRETON *et al.*, 2017].

En prenant en compte la quantité de plastique potentiellement retirée du flux transitant en Seine, soit environ 100 t/an, les flux de plastique estimés entrant en mer seraient compris entre 1 700 et 5 800 t/an.

Conclusions

L'utilisation conjointe d'une approche expérimentale et d'une approche de modélisation conceptuelle a mené à des estimations de flux de plastique exportés de la Seine vers la Mer du même ordre de grandeur (1 700 à 5 800 t/an). Cependant, ces estimations s'appuient sur des hypothèses fortes et/ou souffrent de grandes incertitudes qui restent difficiles à contraindre dans l'état actuel des connaissances. Notre étude a par ailleurs démontré la fragilité des paramètres statistiques et des modèles utilisés à l'échelle globale. Enfin, elle a permis de mettre en évidence le rôle des différents acteurs de la collecte des déchets dans le fleuve. Ils peuvent être une source de données importante malgré le manque d'homogénéité et les fortes divergences dans les pratiques de collecte. Déterminer la proportion que représentent les déchets collectés par rapport à ceux qui ne le sont pas pourrait être une méthode puissante pour reconstituer des flux. Les méthodes de traçage utilisées dans bon nombre de disciplines pourraient y contribuer.

D'autres acteurs de la collecte des déchets restent à identifier. A l'avenir, il serait intéressant de constituer une base de données homogène et commune à tous les acteurs. Elle pourrait servir à la mise au point d'un indicateur de la pollution du fleuve en macro-déchets, notamment plastiques. Par exemple, on pourrait imaginer en extraire une quantité de déchets collectés en fonction d'un effort de collecte (personnes déployées, nombres d'heures, etc.). Ce genre d'indicateur serait à même de répondre à la directive cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM) concernant la surveillance et l'évaluation des flux de déchets issus des cours d'eau. A l'avenir, il pourrait même servir à évaluer l'efficacité des politiques de réduction des macro-déchets. Car au-delà des plastiques, ce sont également des tonnes de métaux, de verre et de déchets du BTP qui sont collectés par ces associations.

Bibliographie

- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) : Statistiques régionales et départementales sur la collecte des déchets ménagers et assimilés. Consultation en mars 2018. Disponible en ligne : http://carto.sinoe.org/carto/enquete_collecte/flash/#.
- BARNES D.K.A., GALGANI F., THOMPSON R.C., BARLAZ M. (2009) : « Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments ». *Philosophical Transaction Of The Royal Society*; 364: 1985-1998.
- COZAR A., ECHEVARRIA F., GONZALEZ-GORDILLO J.I., IRIGOIEN X., UBEDA B., HERNANDEZ-LEAON S., PALMA A.T., NAVARRO S., GARCIA-DE-LOMAS J., RUIZ A., FERNANDEZ-DE-PUELLES M.L., DUARTE C.M. (2014) : « Plastic debris in the open ocean. » *PNAS*; 111: 10239-10244.
- COZAR A., SANZ-MARTIN M., MARTI E., GONZALEZ-GORDILLO J.I., UBEDA B., GALVEZ J.Á., IRIGOIEN X., DUARTE C.M. (2015) : « Plastic Accumulation in the Mediterranean Sea. » *PLOS ONE*; 10: e0121762.
- DRIS R., GASPERI J., ROCHER V., SAAD M., TASSIN B. (2015) : « Premières investigations sur la contamination en microplastiques d'une zone urbaine. » *Techniques Sciences Méthodes*; 25-39.
- ERIKSEN M., LEBRETON L.C.M., CARSON H.S., THIEL M., MOORE C.J., BORERRO J.C., GALAGNI F., RYAN P.G., REISSER J. (2014) : « Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. » *PLOS ONE*; 9.
- FISSE C., LEBOULENGER F., LECARPENTIER T., MOUSSARD S., RANVIER G. (2014) : L'estuaire de la Seine : Etat de santé et évolution : GIP Seine-Aval, Rouen, 48 p.
- GALGANI F., FLEET D., VAN FRANEKER J., KATSANEVAKIS S., MAES T., MOUAT J., OOSTERBAAN L., POITOU I., HANKE G., THOMPSON R.C., AMATO E., BIRKUN A., JANSSEN C. (2010) : « Marine strategy framework directive Task Group 10 Report Marine litter. » *JRC Scientific Technical Report*. 57 p.
- GALGANI F., LEAUTE J., MOGUEDET P., SOUPLET A., VERIN Y., CARPENTIER A., GORAGUER H., LATROUITE D., ANDRAL B., CADIOU Y., MAHE J., POULARD J., NERISSON P. (2000) : « Litter on the Sea Floor Along European Coasts. » *Marine Pollution Bulletin*; 40: 516-527.
- GASPERI J., DRIS R., BONIN T., ROCHER V., TASSIN B. (2014) : « Assessment of floating plastic debris in surface water along the Seine River. » *Environmental Pollution*; 195: 163-166.
- GEYER R., JAMBECK J.R., LAW K.L. (2017) : « Production, use, and fate of all plastics ever made. » *Science Advances*; 3.
- HOFFMAN M.J., HITTINGER E. (2017) : « Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. » *Marine Pollution Bulletin*; 115: 273281.
- HOORNWEG D., BHADA-TATA P. (2012) : What a waste: a global review of solid waste management : *The world bank*, 116 p.
- JAMBECK J.R., GEYER R., WILCOX C., SIEGLER T.R., PERRYMAN M., ANDRADY A., NARAYAN R., LAW K.L. (2015) : « Plastic waste inputs from land into the ocean. » *Science*; 347: 768-771.
- KAMMANN U., AUST M.O., BAHL H., LANG T. (2018) : « Marine litter at the seafloor – Abundance and composition in the North Sea and the Baltic Sea. » *Marine Pollution Bulletin*; 127: 774-780.
- LAHENS L., STRADY E., KIEU-LE T.-C., DRIS R., BOUKERMA K., RINNERT E., GASPERI J., TASSIN B. (2018) : « Macroplastic and microplastic contamination assessment of a tropical river (Saigon River, Vietnam) transversed by a developing megacity. » *Environmental Pollution*; 236: 661-671.
- LEBRETON L.C.M., VAN DER ZWET J., DAMSTEEG J.W., SLAT B., ANDRADY A., REISSER J. (2017) : « River plastic emissions to the world's oceans. » *Nature Communication*; 8: 15611
- LECHNER A., KECKEIS H., LUMESBERGER-LOIS F., ZENS B., KRUSCH R., TRITTHART M., GLAS M., SCHLUDERMANN E. (2014) : « The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. » *Environmental Pollution*; 188: 177-181.
- LEMOINE J.P., VERNEY R. (2015) : Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. *GIP Seine-Aval, Rouen*, 63 p.
- LEROND M. (1997) : Définition des conditions de mise en oeuvre du nettoyage de la Seine - Synthèse. *Parc Naturel Regional de Brotonne*, 76 p.
- LI W.C., TSE H.F., FOK L. (2016) : « Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. » *Science Total Environment*; 566: 333-349.

MAES T., BARRY J., LESLIE H.A., VETHAAK A.D., NICOLAUS E.E.M., LAW R.J., LYONS B.P., MARTINEZ R., HARLEY B., THAIN J.E. (2018) : « Below the surface: Twenty-five years of seafloor litter monitoring in coastal seas of North West Europe (1992–2017). » *Science Total Environment*; 630: 790-798.

MORRITT D., STEFANOUDIS P.V., PEARCE D., CRIMMEN O.A., CLARK P.F. (2014) : « Plastic in the Thames: A river runs through it. » *Marine Pollution Bulletin*; 78: 196-200.

MSWCONSULTANTS (2009) : National visible litter survey and litter cost study : *KEEP AMERICA BEAUTIFUL, INC. STAMFORD, CONNECTICUT*, 216 p.

ORDIF (2017a) : Données de caractérisations locales des ordures ménagères résiduelles (OMR) en île de France : *ORDIF Observatoire Régional des Déchets*, 20 p.

ORDIF (2017b) : LA GESTION DES DÉCHETS MÉNAGERS ET ASSIMILÉS EN ÎLE-DE-FRANCE : *ORDIF, Observatoire Régional des Déchets*, 88 p.

PLASTICSEUROPE (2017) : Plastics - the Facts 2017, an analysis of European plastics production, demand and waste data : *Association of Plastics Manufacturer, Brussels*. 44 p._

POITOU I. (2003) : « Les macrodéchets littoraux : une gestion publique empirique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. » *Méditerranée*; 100: 17-22.

QUILBE R., ROUSSEAU A.N., DUCHEMIN M., POULIN A., GANGBAZO G., VILLENEUVE J.-P. (2006) : « Selecting a calculation method to estimate sediment and nutrient loads in streams: Application to the Beaurivage River (Québec, Canada). » *Journal of Hydrology*; 326: 295-310.

SCHMIDT C., KRAUTH T., WAGNER S. (2017) : « Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. » *Environmental Science Technology*; 51, 21: 12246-12253

SCHNEIDER F., PARSONS S., CLIFT S., STOLTE A., MCMANUS M.C. (2018) : « Collected marine litter — A growing waste challenge. » *Marine Pollution Bulletin*; 128: 162-174.

SEBILLE E. VAN, WILCOX C., LEBRETON L., MAXIMENKO N., HARDESTY B.D., FRANEKER J.A. VAN, ERIKSEN M., SIEGEL D., GALGANI F., LAW K.L. (2015) : « A global inventory of small floating plastic debris. » *Environmental Ressources*; Lett. 10: 124006.

VINK R., BEHRENDT H., SALOMONS W. (1999) : « Development of the heavy metal pollution trends in several European rivers: an analysis of point and diffuse sources. » *Water Science Technology*; 39: 215-223.

WILLIAMS G.P.W. (1989) : « Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. » *Journal of Hydrology*; 111: 89-106.

Acteur	Type de données	Quantité de plastiques (t/an)	Source	Fiabilité (1-5)
Naturaulin	Volumes et Masses	20	Département de la Seine Maritime	4/5
Barrages SIAAP	Masses	27	SIAAP, Gasperi <i>et al.</i> [2014]	4/5
La Seine en Partage	Masses issues de conversions de volumes multi-sources	10	Com. Pers. Association	2/5
Centrales hydroélectriques (Poses + Port-Mort)	Nombre de bennes	10-50	Com. pers. Hydrowatt	3/5

Bateaux nettoyeurs des Hauts de Seine	Tonnages totaux, % déchets verts et industriels valorisés	15	Com. Pers. Dpt Hauts de Seine	3/5
TOTAL		~100	-	-

La fiabilité des estimations est un critère subjectif qui dépend du type de données sources et des opérations nécessaires à leur conversion en flux. La plus faible fiabilité est notée 1, alors que la meilleure est notée 5. A noter que Naturaulin dispose depuis Juin 2018 de la masse exacte des plastiques collectés.

Tableau I. Estimation des quantités de déchets plastiques collectés dans la Seine ou sur ses berges.