



HAL
open science

Dynamique de transfert des macroplastiques en estuaire de Loire : trajectoires et facteurs d'influence

Lauriane Ledieu, Romain Tramoy, David Mabilais, Sophie Ricordel, Bruno
Tassin, Johnny Gasperi

► **To cite this version:**

Lauriane Ledieu, Romain Tramoy, David Mabilais, Sophie Ricordel, Bruno Tassin, et al.. Dynamique de transfert des macroplastiques en estuaire de Loire : trajectoires et facteurs d'influence. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2023, 3, pp.53-62. 10.36904/202303053 . hal-03857515

HAL Id: hal-03857515

<https://hal.science/hal-03857515>

Submitted on 23 Mar 2023

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.

1 **DYNAMIQUE DE TRANSFERT DES MACROPLASTIQUES EN ESTUAIRE DE LOIRE : TRAJECTOIRES**
2 **ET FACTEURS D'INFLUENCE**

3 **MACROPLASTICS TRANSFER DYNAMIC WITHIN THE LOIRE ESTUARY: TRAJECTORIES AND**
4 **INFLUENCING FACTORS**

5 **Ledieu Lauriane¹, Romain Tramoy^{2,3}, David Mabilais¹, Sophie Ricordel¹, Bruno Tassin^{2,3}, Johnny**
6 **Gasperi^{1*}**

7 ¹Univ Gustave Eiffel, GERS-LEE, F-44344 Bouguenais, France

8 ²Univ Paris Est Créteil, LEESU, F-94010 Créteil, France.

9 ³Ecole des Ponts, LEESU, F-77455 Champs-sur-Marne, France.

10 [*johnny.gasperi@univ-eiffel.fr](mailto:johnny.gasperi@univ-eiffel.fr), 0240845882

11

12 **CATEGORIE DE L'ARTICLE : *Recherche appliquée***

13 **FORMAT DE L'ARTICLE : *Article scientifique***

14

15 **TABLE DES MATIERES :**

16	Résumé / Abstract.....	p. 2
17	Introduction.....	p. 3
18	1. Matériels et méthodes.....	p. 4
19	1.1. L'estuaire de Loire.....	p. 4
20	1.2. Acquisition des trajectoires.....	p. 5
21	1.3. Traitement des données.....	p. 6
22	2. Résultats et discussion.....	p. 6
23	2.1. Des dynamiques de transfert chaotiques dans les estuaires.....	p. 6
24	2.2. Une influence globale de la flottabilité.....	p. 8
25	2.3. Une influence de la relation débit-marées dans les estuaires macrotidaux.....	p. 9
26	2.4. Une influence de la géomorphologie spécifique de l'estuaire de Loire.....	p. 10
27	Conclusion.....	p. 14
28	Remerciements.....	p.14
29	Bibliographie.....	p. 15

30

31

32

33 **Résumé**

34 La quantification des flux de macroplastiques transférés par les fleuves fait l'objet de plus en plus d'études
35 scientifiques mais une meilleure appréciation de ces flux nécessite une compréhension fine de la dynamique
36 de transfert de ces déchets en milieu estuarien, interface entre le milieu continental et le milieu océanique. A
37 l'image de ce qui a été réalisé sur la Seine dans le cadre du projet Macro-Plast, cette étude cherche à
38 caractériser la trajectoire des déchets plastiques en estuaire de Loire. Dans ce but, des bouteilles plastiques
39 de flottabilités différentes ont été équipées de balises GPS et lâchées à différents niveaux de l'estuaire entre
40 janvier 2020 et juillet 2021. 35 trajectoires d'un maximum de deux mois ont été enregistrées. Celles-ci
41 présentent une forte variabilité spatiotemporelle avec des distances totales parcourues comprises entre 100
42 m et 103,6 km. Les distances parcourues en estuaire de Loire sont toutefois plus faibles que celles
43 mesurées en Seine. En effet, la morphologie particulière de l'estuaire de Loire (berges à pentes faibles,
44 zones submersibles, roselières) donne lieu à des échouages rapides et une remobilisation difficile des
45 macroplastiques. La flottabilité joue un rôle important dans la dynamique de transfert des macroplastiques
46 mais leurs trajectoires animées par des allers-retours et des phénomènes d'échouage/remobilisation
47 démontrent qu'elles sont également influencées par d'autres facteurs environnementaux dont la marée.
48 Cette dynamique complexe et le fait que comme en estuaire de Seine, aucune bouteille n'a atteint le milieu
49 océanique, questionne l'évaluation des flux réels de macroplastiques transférés des milieux continentaux
50 vers les océans par des méthodes simplement statistiques.

51 **Mots-clés** : stockage, remobilisation, GPS, flottabilité, géomorphologie

52 **Abstract**

53 The quantification of macroplastics fluxes transferred by rivers generates increasing researches but a better
54 assessment of these fluxes requires a precise understanding of macroplastics transfer dynamic within
55 estuaries, environments at the land-ocean interface. Following the strategy deployed in the Seine estuary
56 during the Macro-Plast project, this study aims to characterize macroplastics trajectories in the Loire estuary.
57 Plastic bottles with different buoyancy were therefore equipped with GPS-trackers and released at different
58 locations of the estuary between January 2020 and July 2021, during variable conditions of water flow and
59 tidal ranges. 35 trajectories of maximum two months were monitored. Trajectories demonstrated a high
60 spatiotemporal variability with total distances travelled by the tracked bottles ranging from 100 m to 103.6
61 km. The distances travelled by the tracked bottles were however lower in the Loire estuary than in the Seine
62 one. Indeed, the specific geomorphology of the Loire estuary (riverbanks with gentle slope, submersible
63 areas, reedbeds) lead to a fast stranding and hard remobilization of macroplastics. Bottles buoyancy plays a
64 key role in macroplastics transfer dynamic but their trajectories animated by back and forth movements and
65 stranding/remobilization processes highlighted that they are also influenced by other environmental factors
66 including tides. This complex transfer dynamic and the fact that like in the Seine estuary, no bottle reached
67 the ocean environment, raises questions on the real fluxes transferred from continental environments to
68 oceans estimated with statistical methods.

69 **Keywords**: stranding, remobilization, GPS, buoyancy, geomorphology

70 Introduction

71 Les fleuves et rivières sont considérés comme la voie principale de transfert des macroplastiques des
72 milieux continentaux vers les océans [VAN EMMERIK et SCHWARZ, 2020]. Diverses études cherchent ainsi
73 à quantifier les flux transférés. Par exemple, MEIJER *et al.* [2021] estiment des flux annuels mondiaux
74 compris entre 0,8 et 2,7 millions de tonnes et GONZALEZ-FERNANDEZ *et al.* [2021] des flux annuels à
75 l'échelle européenne compris entre 1 656 et 4 997 tonnes. Les estimations basées sur des statistiques et
76 des modèles conceptuels présentent néanmoins des écarts importants avec les observations de terrain
77 [CASTRO-JIMENEZ *et al.*, 2019 ; DRIS *et al.*, 2020 ; GONZALEZ-FERNANDEZ *et al.*, 2021]. Comme les
78 estuaires se situent à l'interface entre les milieux continentaux et océaniques, il est crucial de savoir
79 comment ces systèmes complexes contribuent à la dynamique de transfert des macroplastiques. Comme
80 pour d'autres familles de polluants, tout le challenge est de savoir si ces milieux transfèrent ou piègent les
81 macroplastiques [VERMEIREN *et al.*, 2016].

82 Malgré ce constat, peu d'études s'intéressent au transfert de macroplastiques dans les environnements
83 estuariens [VAN EMMERIK et SCHWARZ, 2020 ; MAZARRASA *et al.*, 2019 ; TRAMOY *et al.*, 2020a, b]. Les
84 estuaires sont effectivement des environnements complexes où de nombreux processus physiques entrent
85 en interactions. L'évolution spatiotemporelle et le temps de séjour des macroplastiques y sont donc difficiles
86 à quantifier et restent peu compris [TRAMOY *et al.*, 2020a ; VAN EMMERIK *et al.*, 2022]. D'autant plus que
87 parmi le peu d'études réalisées dans ces milieux, les différences méthodologiques rendent souvent les
88 résultats difficilement comparables [DRIS *et al.*, 2020]. De nos jours, le développement de nouvelles
89 technologies facilite ces applications. DUNCAN *et al.* [2020] et TRAMOY *et al.* [2020b] ont notamment
90 démontré l'efficacité des traceurs GPS pour suivre la dynamique de transfert des macroplastiques à une
91 échelle temporelle courte respectivement dans le delta du Gange et l'estuaire de la Seine.

92 En estuaire de Seine, TRAMOY *et al.* [2020a, b] ont mis en évidence des mouvements d'allers-retours et
93 des phénomènes d'échouage/remobilisation dans la dynamique de transfert des macroplastiques. Suite à
94 cette dynamique, les macroplastiques ont de longs temps de séjour qui peuvent aller jusqu'à des décennies.
95 Cela suggère que les estuaires macrotidaux constituent des zones d'accumulation dont de faibles flux de
96 macroplastiques peuvent être transférés vers les océans en cas d'évènements hydrométéorologiques
97 extrêmes. Mais cette tendance est-elle générale ou spécifique à l'estuaire de Seine ?

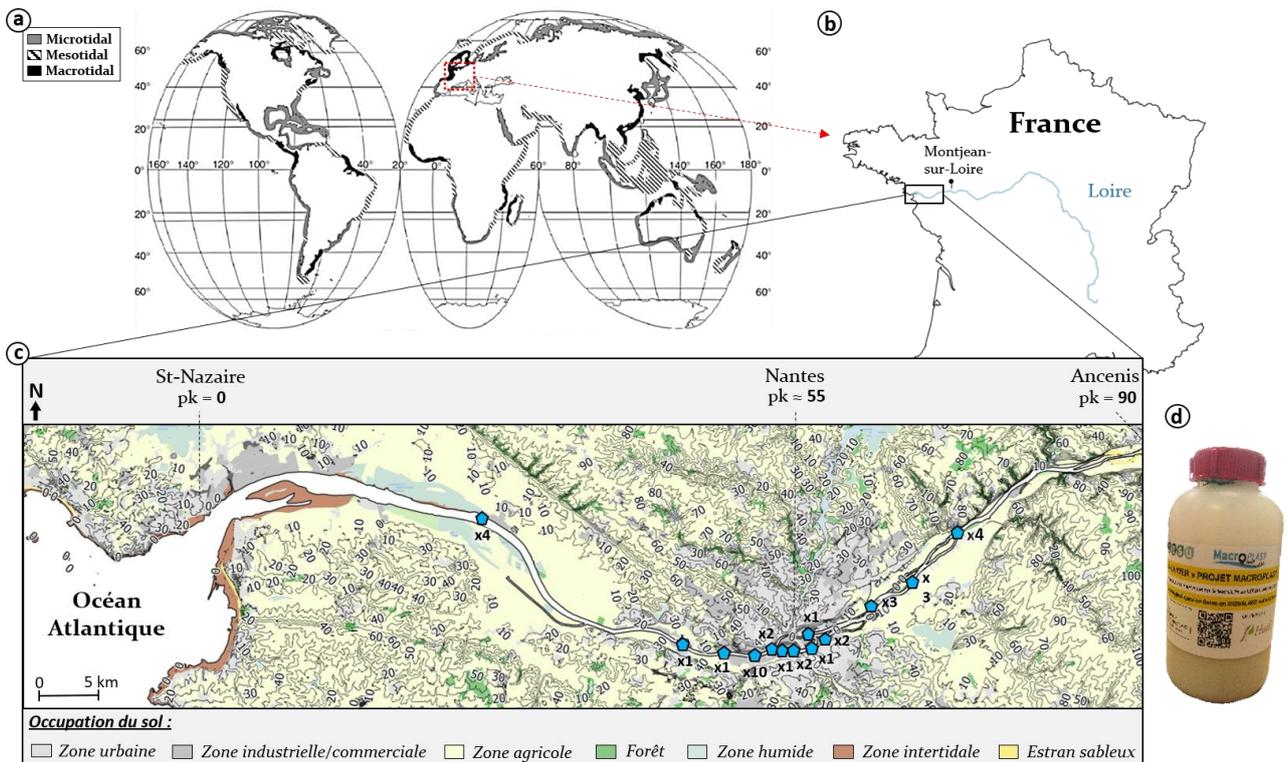
98 Afin d'y répondre, ce travail propose une approche globale de la dynamique de transfert et d'accumulation
99 des macroplastiques en estuaire de Loire. Afin d'identifier les similarités et spécificités de cet estuaire, la
100 même méthodologie que celle employée par TRAMOY *et al.* [2020b] en estuaire de Seine a été employée, à
101 savoir de lâcher des bouteilles équipées de traceurs GPS à différents endroits de l'estuaire. Cette étude a
102 donc pour objectifs de (i) fournir une compréhension du devenir des macroplastiques en estuaire de Loire
103 pour une meilleure gestion de cette pollution, (ii) établir l'influence de la flottabilité des macroplastiques via le
104 lâcher simultané de bouteilles flottantes et semi-immergées, (iii) confirmer le rôle des marées et des
105 conditions hydrométéorologiques dans leurs dynamiques, et (iv) discuter le rôle des spécificités de sites sur
106 la base de nos retours d'expérience sur les estuaires de la Seine et la Loire.

107 1. Matériels et méthodes

108 **1.1. L'estuaire de Loire**

109 La Loire parcourt 1 006 km de long (*figure 1a*) et draine environ 20 % du territoire français [SELLIER, 2012].
 110 Sa partie estuarienne démarre à Ancenis et est longue de 97 km. Le bassin versant depuis l'amont
 111 d'Ancenis jusqu'à l'embouchure représente 3 % du bassin versant total de la Loire (*figure 1b*). Dans cette
 112 partie, la Loire est délimitée par des plateaux étagés et des coteaux à faible altitude, la caractérisant par une
 113 topographie plate, symétrique du nord au sud [SELLIER, 2012]. L'estuaire de Loire est qualifié de
 114 macrotidal¹, avec un marnage > 6 m, [BOET *et al.*, 2011]), (*figure 1a*). Les variations de débit sont
 115 importantes et oscillent entre 100 et 6 000 m³/s (le débit moyen est de 850 m³/s à Montjean sur Loire,
 116 [SELLIER, 2012]).

117



118

119 **Figure 1 : a) Carte mondiale des types d'estuaires (www.aquaportail.com) et position de la France, b)**
 120 **carte de la France et position de la Loire, c) carte de l'estuaire de Loire et des zones de lâchers des**
 121 **bouteilles tracées (pentagones bleus). Le nombre de bouteilles lâchées dans chaque zone est**
 122 **indiqué. Le point kilométrique (pk) 0 est défini à St-Nazaire. Les pk sont ensuite croissants vers**
 123 **l'amont et négatifs vers l'aval. D'amont en aval, les bouteilles ont été lâchées à Mauves-sur-Loire (pk**
 124 **72,2, milieu de pont), St-Julien-de-Concelles (pk 66,9, milieu de pont), Basse-Goulaine (pk 62,2, milieu**
 125 **de pont), St-Sébastien-sur-Loire (pk 57,1, milieu de pont), Nantes (pk 56,3 & 55,8, milieu de pont ; pk**
 126 **50,7, 50,2, 0,1 & 50, berge), Rezé (pk 54,3, milieu de pont ; pk 53,5 & 52,4, berge), Bouguenais (pk 47,9**
 127 **& 46,2, berge) et Le Pellerin (pk 24,5, berge). L'occupation du sol (Corine Land Cover 2018 de**
 128 **www.data.gouv.fr) et la topographie sont indiquées. d) Photo des bouteilles utilisées.**

¹ Estuaire subissant des amplitudes de marées importantes, supérieures à 4 m.

130 Avec la présence de Nantes Métropole (6^{ème} agglomération la plus peuplée de France), la densité de
131 population dans ce territoire est de 200 hab/km² et comprenait au total plus d'un million d'habitants en 2016
132 [SAGE, 2020]. Par rapport à la surface totale du territoire, 9,4 % est urbanisée mais l'occupation du sol est
133 principalement agricole (74,4 %, *figure 1c*). Dans cette partie de la Loire, les berges étagées donnent lieu à
134 la formation de vastes zones humides (6,5 % de sa surface, *figure 1c*) et celles qui se situent à l'aval de
135 Nantes Métropole constituent d'importantes zones submersibles [SAGE, 2020]. En France, ces zones
136 humides sont les plus diversifiées (vasières, roselières, prairies humides, etc., [SNPN, 2008]) et compte tenu
137 de leur fonction écologique, elles sont gérées et protégées [SAGE, 2020]. C'est principalement le cas des
138 roselières qui représentent une surface comprise entre 2 300 et 2 800 ha [GIP, 2016].

139 Afin de maintenir les activités portuaires de Nantes et de St-Nazaire, l'estuaire de Loire a subi certaines
140 modifications de son tracé (comblement de bras et raccordement d'îles) et de ses berges (endiguement et
141 enrochement, [SELLIER, 2012]). Dans la partie aval de la Loire, depuis Montsoreau jusqu'à l'embouchure (~
142 200 km), environ 60 % des berges sont indurées et/ou enrochées [CORELA, 2012]. L'estuaire de Loire est
143 ouvert et peu méandré (index de sinuosité de 1,1).

144

145 1.2. Acquisition des trajectoires

146 L'acquisition des trajectoires, similaire à celle déployée en Seine [TRAMOY *et al.*, 2020b], consiste à équiper
147 des bouteilles plastiques d'1 L (*figure 1d*) avec des traceurs GPS (©INETIS). Afin d'être facilement placés
148 dans les bouteilles, des traceurs GPS très compacts ont été choisis. Ceux-ci permettent de garantir des
149 conditions imperméables et une bonne transmission sans jouer de rôle sur la flottabilité des bouteilles. Le
150 système d'exploitation INET-OS de ces traceurs GPS est configurable et donc propice pour paramétrer un
151 programme adapté à l'étude. Par souci de reproductibilité, la même configuration que celle définie par
152 [TRAMOY *et al.*, 2020b] a été utilisée, à savoir d'enregistrer une position toutes les 2 h afin d'avoir une
153 bonne résolution temporelle durant un cycle de marée. Les positions enregistrées étaient envoyées une fois
154 par jour à un serveur via un système GSM/GPRS.

155 L'influence de la flottabilité des bouteilles a été observée au moyen de 10 lâchers simultanés d'une bouteille
156 flottante et semi-immersée. Avec une masse comprise entre 169 et 269 g, les bouteilles dites « flottantes »
157 étaient couchées à la surface de l'eau et avaient une prise au vent importante. A l'inverse, les bouteilles
158 dites « semi-immersées » étaient lestées avec du sable et avaient des masses comprises entre 788 et 1 004
159 g. Ces dernières étaient verticales avec les trois quarts de la bouteille immergés et le traceur GPS a été
160 maintenu dans la partie émergée.

161 Excepté pour l'influence de la flottabilité des bouteilles, il a été choisi d'utiliser une approche stochastique
162 pour observer et décrire les trajectoires des bouteilles, c'est-à-dire via le lâcher de bouteilles dans différentes
163 zones de l'estuaire et durant différentes conditions hydrométéorologiques (débit, marée, etc.). Entre janvier
164 2020 et juillet 2021, 35 trajectoires ont ainsi été acquises dans l'estuaire de Loire. Les zones de lâchers sont

165 représentées dans la *figure 1c* : 10 ont été lâchées en amont de Nantes Métropole, 19 au niveau de la
166 métropole et 6 en aval. Les bouteilles ont été lâchées au milieu du fleuve depuis des ponts (46 %) ou jetées
167 depuis la berge (à environ 5-10 m, 54 %) afin d'éviter un échouage rapide. Les informations relatives à
168 l'expérimentation ont été annotées sur les bouteilles (*figure 1d*) pour améliorer leur récupération mais sur les
169 35 bouteilles lâchées, 6 n'ont pas pu être récupérées suite à la perte du signal (n = 3), la récupération
170 accidentelle par un service de nettoyage (n = 1) ou parce qu'elles se sont coincées dans des structures
171 portuaires (n = 2). Leurs trajectoires ont quand même été considérées puisque le programme permettait la
172 récupération de leurs positions enregistrées.

173

174 **1.3. Traitement des données**

175 Une trajectoire représente le parcours d'une bouteille dans le temps et dans l'espace depuis son lâcher
176 jusqu'à sa récupération (ou sa perte). Différents paramètres ont été relevés sur les trajectoires : les
177 conditions initiales et finales, des paramètres de distances et de vitesses, le nombre et les conditions des
178 épisodes d'échouage/remobilisation ainsi que les conditions hydrologiques et de marée (*tableau 1*). Les
179 épisodes d'échouage n'ont été considérés que lorsqu'ils étaient supérieurs à 12 h, donc supérieurs à un
180 cycle de marée. Les données de débit ont été prises à la station de Montjean-sur-Loire (*figure 1b*) sur
181 <http://www.hydro.eaufrance.fr/> et les hauteurs d'eau, la position dans le cycle de marée
182 (montante/descendante) et le coefficient de marée ont été pris à la station de St-Nazaire (*figure 1c*) sur
183 <http://maree.info/>. Les trajectoires ont été reconstituées sous QGIS [QGIS.ORG, 2022]. Afin de calculer les
184 paramètres de distances et de vitesses, des points kilométriques (pk) appliqués tous les kilomètres le long
185 d'une ligne virtuelle parcourant l'estuaire, et croissants depuis l'aval (pk = 0 à St-Nazaire ; *figure 1c*) vers
186 l'amont, ont été rattachés à chaque position GPS. Les caractéristiques de chaque site d'échouage
187 (typologies de berges et de végétation) ont également été reportées sous QGIS à l'aide des données
188 fournies par le GIP Loire Estuaire.

189 L'influence de la flottabilité des bouteilles a été explorée via la comparaison de deux clusters de trajectoires
190 définis selon leur caractère flottant (masse = 217 ± 39 g, n = 10) ou semi-immersé (masse = 872 ± 67 g, n =
191 10). L'influence des conditions hydrologiques a été explorée via la comparaison de trois clusters de
192 trajectoires définis selon les valeurs de débit initial (Q_i) : 17 trajectoires acquises en condition de basses
193 eaux ($Q_i = 595 \pm 116$ m³/s), 12 acquises en condition de hautes eaux ($Q_i = 1\,219 \pm 237$ m³/s) et 6 acquises
194 en condition de crue ($Q_i = 3\,161 \pm 827$ m³/s).

195

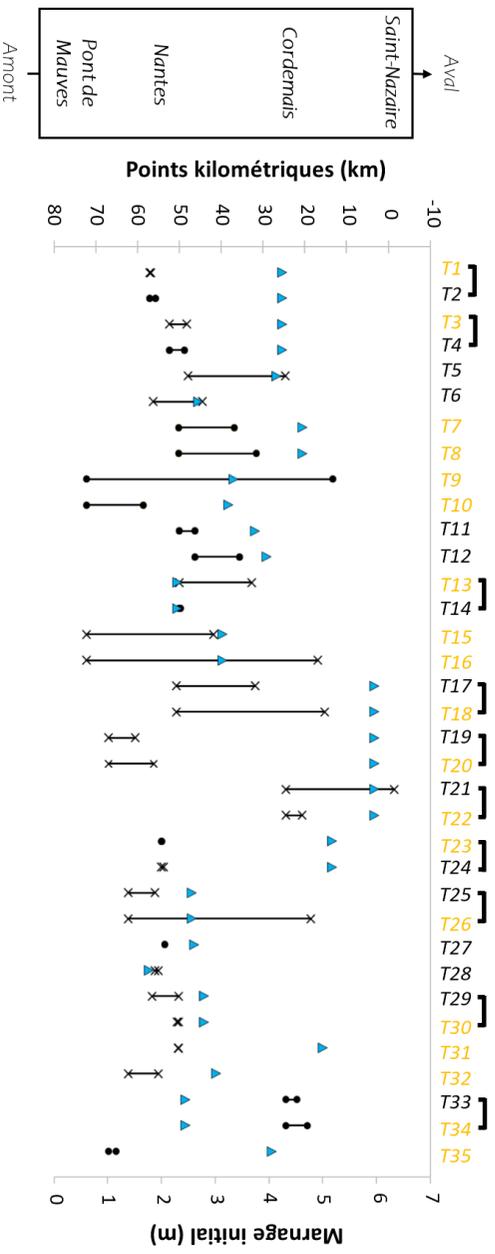
196 **2. Résultats et discussion**

197 **2.1. Des dynamiques de transfert chaotiques dans les estuaires**

198 De façon cohérente avec les quelques études déjà réalisées en milieu estuarien (la Swan, Australie,
199 [HAJBANE et PATTIARATCHI, 2017] ; la baie de Paranaguá, Brésil, [KRELLING et TURRA, 2019], les
200 rivières Pas, Miera et Ason, Espagne, [MAZARRASA *et al.*, 2019], la Seine, France, [TRAMOY *et al.*,

201 2020b]), la dynamique de transfert des macroplastiques en estuaire de Loire démontre une grande variabilité
 202 spatiotemporelle. Les distances nettes parcourues par les bouteilles sont comprises entre -6,4 (la bouteille
 203 est remontée dans l'estuaire) et 59 km (médiane = 6,3 km, *figure 2*) au cours de trajectoires allant de 6 h à
 204 64 jours (médiane = 11 jours). De même, les distances totales parcourues oscillent entre 100 m et 103,6 km
 205 (médiane = 10,6 km) et les vitesses maximums atteintes, entre 0 (bouteille directement échouée) et 32 km/h
 206 (médiane = 4,2 km). Cette variabilité peut être expliquée par une combinaison de facteurs. Si dans les
 207 rivières, la dynamique de transfert des macroplastiques résulte des conditions hydrologiques (niveau d'eau,
 208 vitesse du courant et débit ; [VAN EMMERIK et al., 2020a ; VAN EMMERIK et SCHWARZ, 2020], tout
 209 comme des caractéristiques intrinsèques des macroplastiques (forme, taille, masse et composition) qui
 210 affectent leur flottabilité et donc leur mode de transport [VERMEIREN et al., 2016], en milieu estuarien
 211 s'ajoutent l'effet des marées [SADRI et THOMPSON, 2014] et des conditions météorologiques (vitesse et
 212 direction du vent, [BROWNE et al., 2010 ; RECH et al., 2014] ; pression atmosphérique, [TRAMOY et al.,
 213 2020b]). Les facteurs d'influence sont donc difficiles à isoler et hiérarchiser. Dans le cas de l'estuaire de
 214 Loire par exemple, la flottabilité des bouteilles, les zones de lâchers ou le marnage ne suffisent pas à
 215 expliquer la variabilité des distances nettes parcourues par les bouteilles tracées (*figure 2*). Cela met en
 216 évidence qu'en milieu estuarien, les macroplastiques n'ont pas un transfert linéaire mais des trajectoires
 217 chaotiques animées par des processus stochastiques [TRAMOY et al., 2020b].

218



219

220 **Figure 2 : Distances nettes (en km) parcourues par les bouteilles tracées entre leurs points**
 221 **kilométriques (pk) initiaux et finaux en fonction du marnage initial (triangles bleus, en m). Les**
 222 **trajectoires pour lesquelles la distance nette parcourue est différente de la distance totale sont**
 223 **représentées par des croix de part et d'autre de leur trajectoire. Les trajectoires de bouteilles**
 224 **flottantes sont nommées en noires, tandis que celle des bouteilles semi-immergées sont nommées**
 225 **en jaune. Les bouteilles flottantes et semi-immergées lâchées simultanément sont indiquées par des**
 226 **crochets.**

227 Parmi les processus physiques qui expliquent ce caractère chaotique, la marée joue un rôle important sur
 228 les distances parcourues et le temps de séjour des macroplastiques dans les estuaires [LIRO et al., 2020].

229 Les différences observées entre les distances totales et nettes parcourues par les bouteilles tracées en
230 estuaire de Loire (*figure 2*) indiquent des mouvements d'allers-retours résultant des flux bidirectionnels des
231 marées, tout comme en estuaire de Seine [TRAMOY *et al.*, 2020b]. De tels mouvements ont également déjà
232 été observés dans des estuaires microtidaux [RYAN et PEROLD, 2021 ; VAN EMMERIK *et al.*, 2020b].
233 Compte tenu de la valeur maximale de cette différence en estuaire de Loire (92,8 km), les macroplastiques
234 peuvent être facilement repoussés vers l'amont. Les marées génèrent aussi des variations importantes de la
235 hauteur d'eau et ces variations animent des cycles d'échouage/remobilisation [TRAMOY *et al.*, 2020b ; VAN
236 EMMERIK *et al.*, 2020b]. En estuaire de Loire, des épisodes d'échouages ont effectivement été observés
237 lors de toutes les trajectoires acquises. Certaines trajectoires présentaient jusqu'à trois épisodes d'échouage
238 (*figure 5*) impliquant des phénomènes de remobilisation, majoritairement au cours de la marée montante (62
239 % des remobilisations). De plus, les épisodes d'échouage pour lesquels aucune remobilisation n'a été
240 observée survenaient pendant le coefficient de marée le plus important de la période suivie pour 69 % des
241 trajectoires. D'ailleurs VERMEIREN *et al.* [2016] ont conceptualisé les zones intertidales² comme étant des
242 puits temporaires de macroplastiques et la majorité des bouteilles tracées se sont effectivement échouées
243 au sein de ces zones en estuaire de Loire (*figure 5*). En plus d'avoir des trajectoires chaotiques, les
244 macroplastiques ont donc un temps de séjour dans les estuaires plus important qu'on ne le pensait
245 auparavant [TRAMOY *et al.*, 2020b ; VAN EMMERIK *et al.*, 2020b].

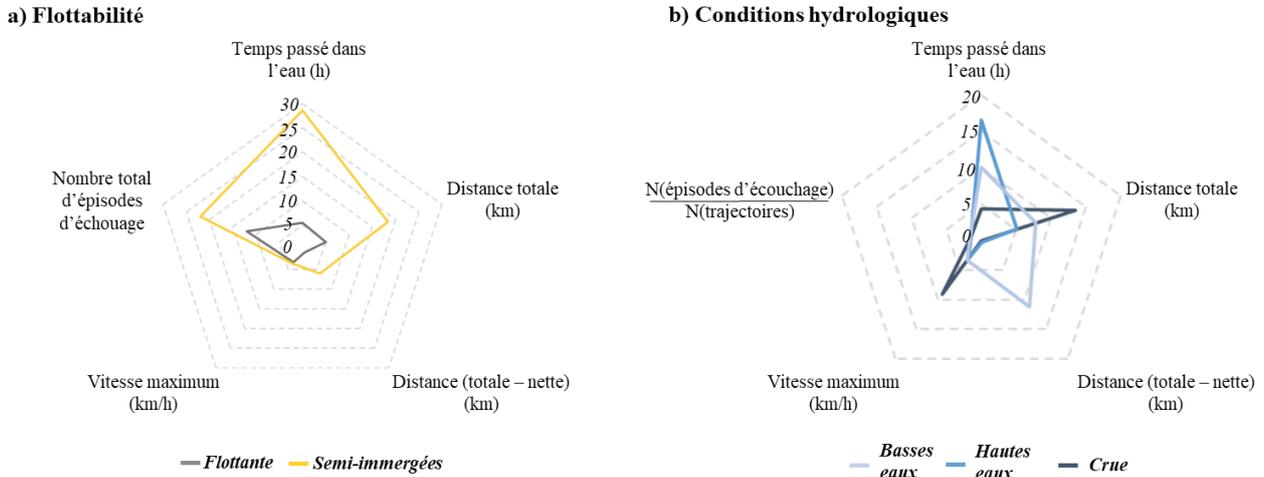
246 **2.2. Une influence de la flottabilité**

247 Dans les fleuves, les macroplastiques peuvent être transportés de différentes façons : flottants à la surface
248 de l'eau, immergés dans la colonne d'eau ou par saltation sur le lit du fleuve [VAN EMMERIK *et al.*, 2020a].
249 Ces différents modes de transport entraînent des dynamiques de transfert et des phénomènes
250 d'échouage/remobilisation différents. Les bouteilles flottantes et semi-immersées présentent des trajectoires
251 distinctes en estuaire de Loire. Les durées passées dans l'eau par les bouteilles semi-immersées étaient
252 significativement supérieures à celles des bouteilles flottantes (*figure 3*). Les bouteilles flottantes ont
253 parcouru des distances totales (*figure 3*) et nettes (médiane = 3,2 km) faibles, suggérant un échouage rapide
254 et proche de leurs zones d'émission. Celles-ci se sont d'ailleurs principalement échouées dans les zones
255 intertidales² à marée descendante. Un tel comportement a déjà été observé en milieu estuarien [RYAN et
256 PEROLD, 2021 ; TRAMOY *et al.*, 2020b] et pourrait résulter d'un effet plus important du vent sur les déchets
257 transportés à la surface de l'eau [BROWNE *et al.*, 2010 ; MACLEAN *et al.*, 2021 ; VAN EMMERIK et
258 SCHWARZ, 2020]. Dans le cas de l'estuaire de Loire, cette hypothèse est appuyée par des vitesses
259 maximales de 9 km/h atteintes par les bouteilles flottantes tandis que celles des bouteilles semi-immersées
260 n'étaient que de 5,8 km/h. Les bouteilles semi-immersées sont donc plus sensibles à la force motrice de
261 l'eau, impliquant des zones d'accumulation et une capacité de remobilisation différentes des bouteilles
262 flottantes. Les bouteilles semi-immersées se sont effectivement principalement échouées à marée
263 montante, aussi bien dans des canaux latéraux et des zones submersibles que dans des zones intertidales².
264 De plus, celles-ci ont montré un nombre d'échouages supérieur (22 au total) aux bouteilles flottantes (12 au
265 total, *figure 3*), impliquant davantage de phénomènes de remobilisation. Néanmoins, compte tenu de leurs
266 zones d'échouage (canaux latéraux, zones submersibles), uniquement 58 % des épisodes de remobilisation

² Zone de berge comprise entre le niveau d'eau à marée haute et le niveau d'eau à marée basse.

267 ont permis un nouveau transfert vers l'aval. La flottabilité des macroplastiques tient donc un rôle
 268 prépondérant dans leurs distances de transfert mais aussi dans leurs zones d'accumulation et leurs temps
 269 de séjour.

270



271

272 **Figure 3 : Valeurs médianes de différents paramètres selon a) la flottabilité des bouteilles (flottantes,**
 273 **n = 10 ; semi-immergées, n = 10) et b) les conditions hydrologiques (basses eaux, n = 17 ; hautes**
 274 **eaux, n = 12 ; crue, n = 6).**

275

276 2.3. Une influence de la relation débit-marées dans les estuaires macrotidaux

277 La dynamique de transfert des macroplastiques au sein des estuaires est conditionnée par la marée mais
 278 également le débit du fleuve [DRIS *et al.*, 2020 ; TRAMOY *et al.*, 2020b]. En estuaire de Loire, les processus
 279 qui dominent diffèrent selon la saison. En conditions de basses eaux, d'importantes différences entre les
 280 distances totales et nettes parcourues par les bouteilles tracées (*figure 3*) indiquent une forte influence des
 281 marées. A l'inverse, aucune différence n'a été observée en conditions de crue (*figure 3*) malgré des marées
 282 importantes (jusqu'à 4,6 m). Dans ces conditions, les durées passées dans l'eau par les bouteilles étaient
 283 les plus faibles mais leurs distances totales parcourues étaient les plus élevées (*figure 3*). Lors des crues, un
 284 effet de « chasse d'eau » conduit donc à un transfert rapide des macroplastiques vers l'aval. Les vitesses
 285 maximales atteintes par les bouteilles étaient d'ailleurs trois fois plus élevées dans ces conditions qu'en
 286 conditions de hautes ou basses eaux (*figure 3*). La dynamique de transfert des macroplastiques est dominée
 287 par les marées lors des périodes à faible débit et dominée par le débit fluvial en conditions de crue. Un tel
 288 comportement a également été observé dans l'estuaire de la Seine [TRAMOY *et al.*, 2020b], confirmant que
 289 les évènements hydrométéorologiques extrêmes jouent un rôle clé dans les distances de transfert et le
 290 temps de séjour des macroplastiques [DRIS *et al.*, 2020]. Il est donc crucial de s'intéresser à ces
 291 évènements qui sont plus susceptibles d'exporter les macroplastiques, qu'ils soient déjà présents dans la
 292 colonne d'eau ou remobilisés depuis les berges [VAN EMMERIK *et al.*, 2022]. D'ailleurs, plusieurs études
 293 ont observé une accumulation accrue de macrodéchets avec l'augmentation du débit [CHEUNG *et al.*,

294 2016 ; KRELLING et TURRA, 2019] et cette tendance peut s'expliquer par des remobilisations accrues en
295 d'autres points du bassin versant [CASTRO-JIMENEZ *et al.*, 2019 ; KURNIAWAN et IMRON, 2019 ; VAN
296 EMMERIK *et al.*, 2022]. En estuaire de Loire par exemple, uniquement 42 % des épisodes de remobilisation
297 survenus en conditions de basses eaux ont vraiment entraîné un nouvel export des bouteilles vers l'aval,
298 tandis que cette proportion atteignait 83 % en condition de hautes eaux.

299 RYAN et PEROLD [2021] ont déjà évoqué des distances de transfert spécifiques à chaque estuaire selon
300 les différentes relations débit-marées. Compte tenu de cette relation et des cycles de marées de vive-eau et
301 de morte-eau dans les estuaires macrotidaux, les phénomènes d'échouage/remobilisation sont amplifiés.
302 Effectivement, en estuaire de Loire comme en estuaire de Seine, aucune des bouteilles tracées n'a atteint le
303 milieu océanique durant le suivi effectif des bouteilles (*figure 2* ; [TRAMOY *et al.*, 2020b]). Des épisodes
304 d'échouages ont déjà été observés dans des systèmes deltaïques [ACHA *et al.*, 2003] mais dans le delta du
305 Gange par exemple, uniquement pour 40 % des bouteilles tracées [DUNCAN *et al.*, 2020]. La plupart des
306 épisodes d'échouage observés dans le delta du Gange sont d'ailleurs survenus durant la pré-mousson
307 [DUNCAN *et al.*, 2020]. Cela souligne la récente suggestion que les estuaires macrotidaux constituent
308 davantage une zone d'accumulation pour les macroplastiques. En estuaire de Seine, TRAMOY *et al.* [2020a]
309 ont estimé un potentiel temps de séjour des macroplastiques de l'ordre de décennies. En estuaire de Loire,
310 le temps de séjour n'a pas pu être estimé mais est au minimum supérieur à deux mois et donc en réalité
311 plus élevé que le temps de séjour de l'eau (entre 3 et 30 jours, [BRIANT *et al.*, 2021]). Les modélisations des
312 flux de macroplastiques transférés vers les océans doivent donc prendre ce point en considération [DRIS *et*
313 *al.*, 2020 ; TRAMOY *et al.*, 2020b].

314

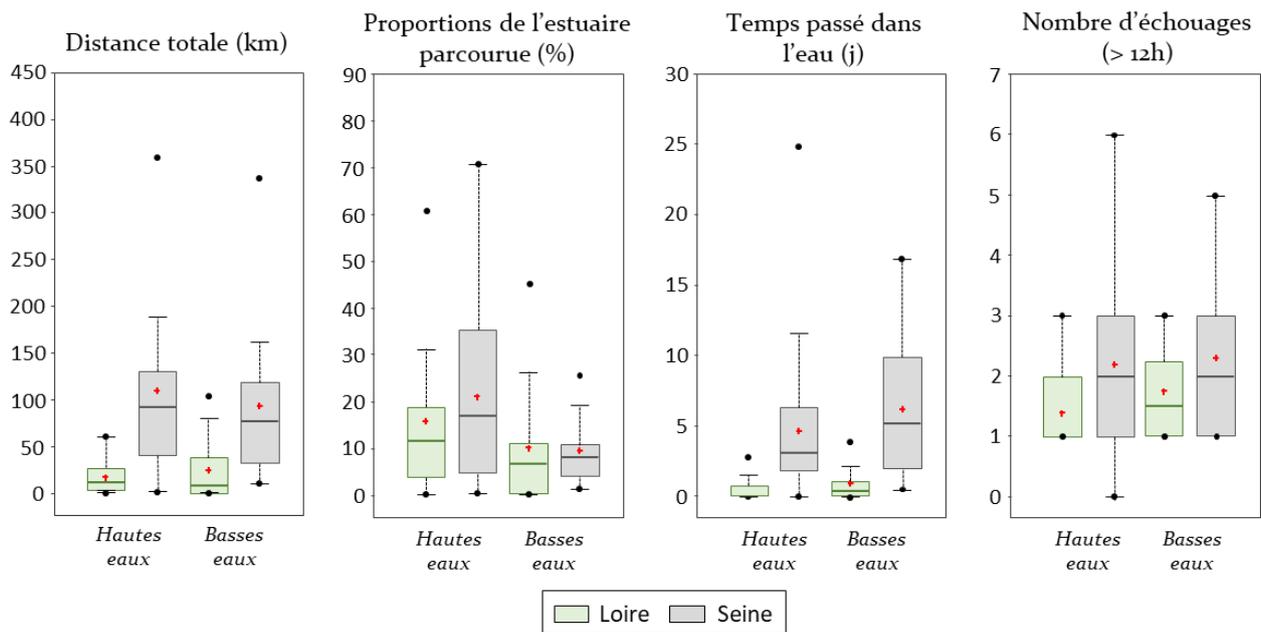
315 **2.4. Une influence de la géomorphologie spécifique de l'estuaire de Loire**

316 Bien que la dynamique de transfert et d'accumulation des macroplastiques présentent des similarités entre
317 les estuaires macrotidaux de la Loire et de la Seine, quelques spécificités de l'estuaire de la Loire sont
318 observées. Pour comparer les dynamiques des bouteilles tracées entre ces deux estuaires, les trajectoires
319 ont été comparées selon les conditions hydrologiques dans la *figure 4*.

320 Bien que l'estuaire de Loire soit plus court et faiblement méandré comparativement à celui de la Seine, les
321 bouteilles ont passé des durées cumulées dans l'eau bien plus courtes (*figure 4*). En estuaire de Seine, les
322 bouteilles ont donc parcouru des distances plus importantes indépendamment des conditions hydrologiques
323 (*figure 4*). Ainsi, bien qu'il soit reconnu que les méandres favorisent l'accumulation de macroplastiques par
324 rapport à des sections linéaires [MAZARRASA *et al.*, 2019 ; VAN EMMERIK *et al.*, 2019], la morphologie
325 méandree de l'estuaire de Seine n'implique pas nécessairement leur échouage rapide ou du moins un long
326 temps de séjour une fois échoués. En réalité, les trajectoires enregistrées en estuaire de Seine présentent
327 un nombre d'échouages par trajectoire (jusqu'à 6) supérieur à celles enregistrées en Loire (*figure 4*), où 54
328 % des trajectoires ne présentent qu'un seul épisode, suggérant que les phénomènes de remobilisation
329 interviennent moins facilement et fréquemment. D'autant plus que seulement 52 % des épisodes de
330 remobilisation ont réellement permis à la bouteille tracée d'être à nouveau transférée entre 200 m et 65,1 km
331 vers l'aval. Les 48 % restants regroupent des épisodes de remobilisation où la bouteille tracée a été poussée

332 de 100 à 200 m sur la berge, de 200 m à 1,1 km plus loin dans des zones submersibles ou de 200 m à 1,4
 333 km en amont de canaux latéraux (figure 5). Ces dynamiques différentes peuvent s'expliquer par les
 334 morphologies et typologies des berges distinctes entre les deux estuaires. LIRO *et al.* [2020] ont d'ailleurs
 335 émis l'hypothèse que des rivières naturelles et complexes avec un chenal vaste et des zones submersibles
 336 (cas de la Loire) pouvait limiter le transfert des macroplastiques vers l'aval comparativement à des rivières
 337 canalisées et endiguées (cas de la Seine). Les résultats de cette étude illustrent en effet cette hypothèse et
 338 confirment que la géomorphologie spécifique de l'estuaire de Loire limite le transfert des macroplastiques
 339 vers l'aval.

340



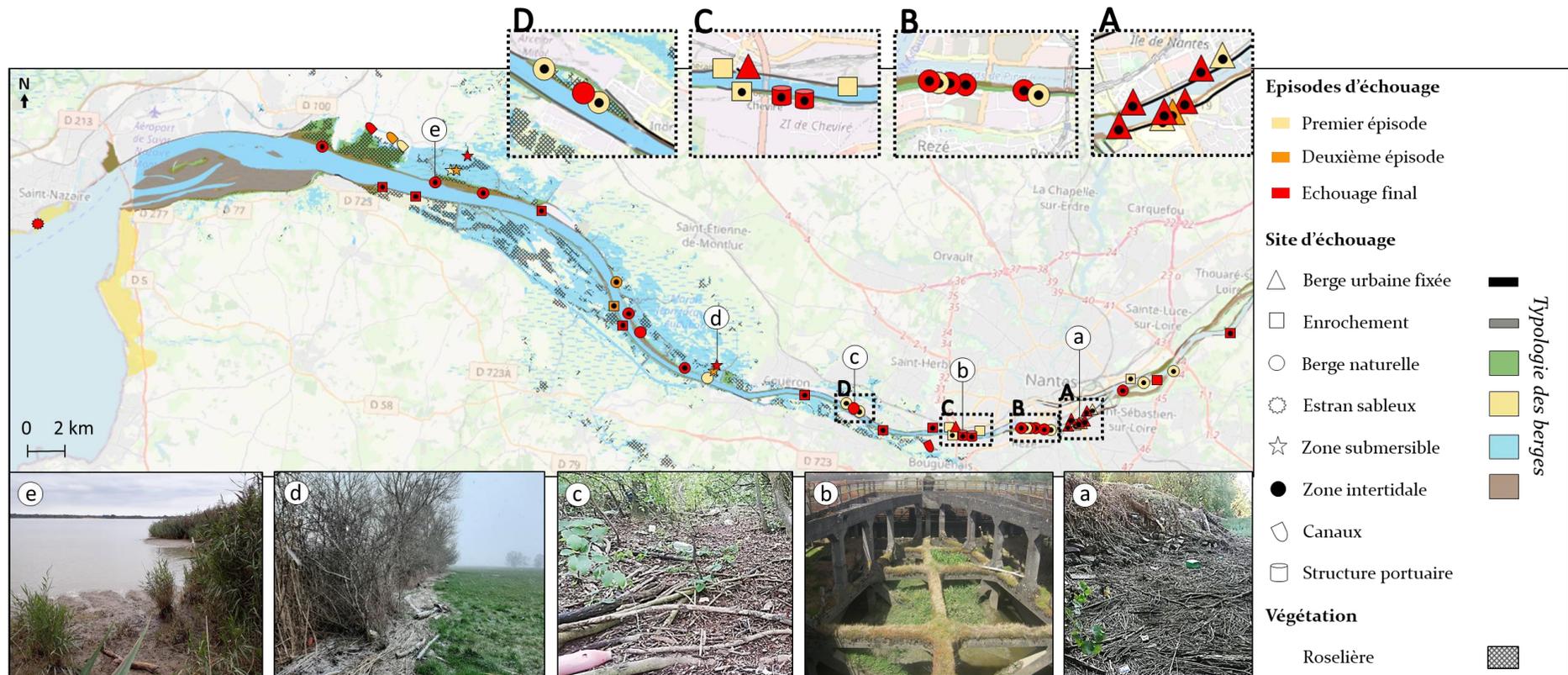
341

342 **Figure 4 : Boîtes à moustaches représentant la variabilité (premier et troisième quartiles, médiane,**
 343 **moyenne (croix rouges) et 1,5 fois l'écart interquartile (barres verticales)) de la distance totale, des**
 344 **proportions de l'estuaire parcourues (calculées en divisant la distance nette par la longueur totale de**
 345 **l'estuaire), du temps passé dans l'eau et du nombre d'échouages (> 12h) selon l'estuaire considéré**
 346 **et en fonction des conditions hydrologiques (hautes eaux (avec épisodes de crues), n(Loire) = 18,**
 347 **n(Seine) = 23; basses eaux, n(Loire) = 17, n(Seine) = 13).**

348

349 La géomorphologie de l'estuaire et des berges est effectivement un facteur prédominant dans la genèse de
 350 zones d'accumulation pour les macroplastiques. Premièrement, des caractéristiques telles que des berges à
 351 pente douce [BROWNE *et al.*, 2010], des méandres [MAZARRASA *et al.*, 2019 ; TRAMOY *et al.*, 2020b] ou
 352 des zones hautes et plates [IVAR DO SUL *et al.*, 2014] ont été reconnues comme des zones d'accumulation
 353 préférentielles pour les macroplastiques. Dans le cas de l'estuaire de Loire, les berges à pente douce ainsi
 354 que la présence d'îles et de zones submersibles semblent favoriser l'accumulation des macroplastiques
 355 (figure 5), tandis que les berges de la Seine sont plus escarpées. Deuxièmement, la végétation rivulaire

356 constitue également un facteur propice à l'accumulation des macroplastiques [GONÇALVES *et al.*, 2020 ;
357 IVAR DO SUL *et al.*, 2014] et la majorité des bouteilles ont effectivement été retrouvées dans la végétation
358 bordant les rives de l'estuaire de Loire. 54 % ont d'ailleurs été retrouvés dans des roselières et une capacité
359 de rétention significative a déjà été suggérée pour cette végétation [VAN EMMERIK et SCHWARZ, 2020]
360 puisqu'elle est régie par ses caractéristiques structurales [MAZARRASA *et al.*, 2019] comme la densité de
361 plants, sa configuration spatiale et sa hauteur [VAN EMMERIK *et al.*, 2022]. D'ailleurs, parmi les bouteilles
362 échouées dans la végétation rivulaire dans la partie aval de l'estuaire, les bouteilles échouées dans des
363 prairies ou des bois ont été plus facilement remobilisées que celles échouées dans des roselières. Les
364 zones d'accumulation peuvent donc être très variées selon l'estuaire considéré [RECH *et al.*, 2014]. Celles-
365 ci sont généralement localisées [RYAN et PEROLD, 2021] et des études spécifiques de sites procurent des
366 informations importantes pour optimiser localement les stratégies de récupération des macroplastiques [VAN
367 CALCAR et VAN EMMERIK, 2019]. En estuaire de Seine par exemple, le site Villequier est connu pour être
368 une forte zone d'accumulation et est par conséquent régulièrement nettoyé, tout comme d'autres zones
369 identifiées [TRAMOY *et al.*, 2021]. En estuaire de Loire, les zones d'accumulation apparaissent plus variées
370 et étendues dans la plaine d'inondation mais certaines zones en aval de Nantes Métropole et les roselières
371 ont été identifiées comme étant significatives. En plus des quelques initiatives locales, des actions régulières
372 de nettoyage similairement à celles réalisées en Seine pourraient donc être envisagées. Si non, il peut être
373 supposé que les changements saisonniers de végétation pourraient favoriser la remobilisation des
374 macroplastiques accumulés et/ou que ces derniers pourraient se fragmenter en microplastiques [DRIS *et al.*,
375 2020 ; GONÇALVES *et al.*, 2020 ; IVAR DO SUL *et al.*, 2014] créant une source secondaire de
376 microplastiques dans l'écosystème fluvial et océanique.



377

378

379 **Figure 5 : Carte des zones d'échouage. Les couleurs indiquent l'ordre des épisodes d'échouage et ainsi leur potentielle remobilisation. Les symboles**
 380 **correspondent aux sites d'échouage selon la typologie des berges. Cette typologie ainsi que la présence de roselières (données du GIP Loire**
 381 **Estuaire) sont indiquées sur la carte. Des photos de zones d'accumulation au niveau (a) de berges urbaines fixées au sud de Nantes Métropole, (b) de**
 382 **structures portuaires, (c) de l'île de la Motte, (d) de la végétation rivulaire dans des zones submersibles et (e) de roselières, sont affichées.**

383 **Conclusion**

384 La dynamique de transfert des macroplastiques présente une grande variabilité spatiotemporelle dans les
385 estuaires, ce qui la rend difficile à qualifier, quantifier et in fine à prédire. De façon cohérente avec d'autres
386 études dans les estuaires, cette étude illustre des trajectoires de macroplastiques chaotiques et
387 progressives animées par des mouvements d'allers-retours et des phénomènes d'échouage/remobilisation
388 relatifs aux marées. Ces phénomènes ne sont pas spécifiques aux estuaires macrotidaux mais en lien avec
389 les oscillations de marées les plus importantes, ces phénomènes y sont amplifiés. Parmi les 74 bouteilles
390 lâchées dans les estuaires de Seine et de Loire, aucune n'a atteint l'Océan Atlantique pendant la période
391 enregistrée (au-delà de 2 mois), suggérant que les estuaires macrotidaux constituent des réservoirs
392 importants de macroplastiques. Ces résultats soulèvent des questions quant aux réels flux de
393 macroplastiques transférés depuis les fleuves vers les océans comparativement aux estimations réalisées
394 par modélisation. Cette étude met également en évidence l'influence de plusieurs facteurs.
395 Indépendamment du type d'estuaire considéré, la flottabilité des macroplastiques tient un rôle majeur dans
396 leur dynamique de transfert, leurs zones d'accumulation et leur temps de séjour. A l'inverse,
397 indépendamment de leur flottabilité, le transfert des macroplastiques dans les estuaires macrotidaux n'est
398 pas dominé par les mêmes processus selon le débit. En condition de crue, le transfert est dominé par le
399 débit fluvial soulignant la nécessité de s'intéresser aux évènements hydrométéorologiques extrêmes. De
400 plus, les zones intertidales et la végétation rivulaire apparaissent comme deux éléments clés dans
401 l'accumulation des macroplastiques. En estuaire de Loire, la présence de zones submersibles, de roselières,
402 d'îles et de canaux latéraux amplifie cette rétention comparativement à l'estuaire de Seine. Les zones
403 d'accumulation sont donc diverses mais certaines identifiées dans le cadre de cette étude font l'objet d'un
404 suivi, tandis que d'autres sont régulièrement nettoyées.

405

406 **Remerciements**

407 Cette étude a été financée par la Région des Pays de la Loire et par Nantes Métropole dans le cadre du
408 projet de recherche Plasti-nium. Ce projet bénéficie de la structuration scientifique de l'Observatoire des
409 Sciences de l'Univers de Nantes (OSUNA) et de son programme « Grande Zone Estuarienne et Risques »
410 (GZER). Les auteurs remercient vivement le GIP Loire Estuaire pour les données géographiques sur
411 l'estuaire de la Loire.

412

413 **Bibliographie**

- 414 ACHA, E.M., MIANZAN, H.W., IRIBARNE, O., GAGLIARDINI, D.A., LASTA, C., DALEO, P. (2003) : «The
415 role of the Río de la Plata bottom salinity front in accumulating debris. » *Marine Pollution Bulletin*; 46: 197–
416 202.
- 417 BOËT, P., BOCQUENÉ, G., BOULEAU, G., ETCHEBERT, H., FOUSSARD, V., JUST, A., LEPAGE, M.,
418 LOBRY, J., MOUSSARD, S., SIROST, O., SOTTOLICHIO, A., LEVEQUE, C. (2011) : *Synthèse du projet*
419 *BEEST* : Rapport de l'IRSTEA 101.
- 420 BRIANT, N., CHIFFOLEAU, J.-F., KNOERY, J., ARAUJO, D.F., PONZEVERA, E., CROCHET, S., THOMAS,
421 B., BRACH-PAPA, C. (2021) : « Seasonal trace metal distribution, partition and fluxes in the temperate
422 macrotidal Loire Estuary (France). » *Estuarine, Coastal and Shelf Science*; 262: 107616.
- 423 BROWNE, M.A., GALLOWAY, T.S., THOMPSON, R.C. (2010) : « Spatial Patterns of Plastic Debris along
424 Estuarine Shorelines. » *Environmental Science & Technology*; 44: 3404–3409.
- 425 CASTRO-JIMÉNEZ, J., GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, D., FORNIER, M., SCHMIDT, N., SEMPÉRÉ, R. (2019) :
426 « Macro-litter in surface waters from the Rhone River: Plastic pollution and loading to the NW Mediterranean
427 Sea. » *Marine Pollution Bulletin*; 146: 60–66.
- 428 CHEUNG, P.K., CHEUNG, L.T.O., FOK, L. (2016) : « Seasonal variation in the abundance of marine plastic
429 debris in the estuary of a subtropical macro-scale drainage basin in South China. » *Science of The Total*
430 *Environment*; 562: 658–665.
- 431 CORELA (2012) : *Inventaire et cartographie des berges de Loire entre Saint-Nazaire et Montsoreau* :
432 Rapport du Conservatoire régional des rives de la Loire et de ses affluents 105.
- 433 DRIS, R., TRAMOY, R., ALLIGANT, S., GASPERI, J., TASSIN, B. (2020) : « Plastic Debris Flowing from
434 Rivers to Oceans: The Role of the Estuaries as a Complex and Poorly Understood Key Interface ». In:
435 Rocha-Santos, T., Costa, M., Mouneyrac, C., eds. *Handbook of Microplastics in the Environment*. Springer
436 International Publishing. p. 1-28.
- 437 DUNCAN, E.M., DAVIES, A., BROOKS, A., CHOWDHURY, G.W., GODLEY, B.J., JAMBECK, J.,
438 MADDALENE, T., NAPPER, I., NELMS, S.E., RACKSTRAW, C., KOLDEWEY, H. (2020) : « Message in a
439 bottle: Open source technology to track the movement of plastic pollution. » *PLoS ONE*; 15.
- 440 GIP (2016) : *Inventaire des roselières de l'estuaire de la Loire, acquisition et analyse de données. Précisions*
441 *méthodologiques et analyse diachronique* : Rapport du GIP Loire Estuaire.
- 442 GONÇALVES, M., SCHMID, K., ANDRADE, M.C., ANDRADES, R., PEGADO, T., GIARRIZZO, T. (2020) : «
443 Are the tidal flooded forests sinks for litter in the Amazonian estuary? » *Marine Pollution Bulletin*; 161:
444 111732.
- 445 GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, D., CÓZAR, A., HANKE, G., VIEJO, J., MORALES-CASELLES, C., BAKIU, R.,

446 BARCELÓ, D., BESSA, F., BRUGE, A., CABRERA, M., CASTRO-JIMÉNEZ, J., CONSTANT, M., CROSTI,
447 R., GALLETI, Y., KIDEYS, A.E., MACHITADZE, N., PEREIRA DE BRITO, J., POGOJEVA, M., RATOLA, N.,
448 RIGUEIRA, J., ROJO-NIETO, E., SAVENKO, O., SCHÖNEICH-ARGENT, R.I., SIEDLEWICZ, G., SUARIA,
449 G., TOURGELI, M. (2021) : « Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean. » *Nature Sustainability*,
450 4: 474–483.

451 HAJBANE, S., PATTIARATCHI, C.B. (2017) : « Plastic Pollution Patterns in Offshore, Nearshore and
452 Estuarine Waters: A Case Study from Perth, Western Australia. » *Frontiers in Marine Science*; 4.

453 IVAR DO SUL, J.A., COSTA, M.F., SILVA-CAVALCANTI, J.S., ARAÚJO, M.C.B. (2014) : « Plastic debris
454 retention and exportation by a mangrove forest patch. » *Marine Pollution Bulletin*; 78: 252–257.

455 KRELLING, A.P., TURRA, A. (2019) : « Influence of oceanographic and meteorological events on the quantity
456 and quality of marine debris along an estuarine gradient. » *Marine Pollution Bulletin*; 139: 282–298.

457 KURNIAWAN, S.B., IMRON, M.F. (2019) : « Seasonal variation of plastic debris accumulation in the estuary
458 of Wonorejo River, Surabaya, Indonesia. » *Environmental Technology & Innovation*; 16: 100490.

459 LIRO, M., EMMERIK, T. VAN, WYŻGA, B., LIRO, J., MIKUŚ, P. (2020) : « Macroplastic Storage and
460 Remobilization in Rivers. » *Water*; 12: 2055.

461 MACLEAN, K., WEIDEMAN, E.A., PEROLD, V., RYAN, P.G. (2021) : « Buoyancy affects stranding rate and
462 dispersal distance of floating litter entering the sea from river mouths. » *Marine Pollution Bulletin*; 173:
463 113028.

464 MAZARRASA, I., PUENTE, A., NÚÑEZ, P., GARCÍA, A., ABASCAL, A.J., JUANES, J.A. (2019) : « Assessing
465 the risk of marine litter accumulation in estuarine habitats. » *Marine Pollution Bulletin*; 144: 117–128.

466 MEIJER, L.J.J., VAN EMMERIK, T., VAN DER ENT, R., SCHMIDT, C., LEBRETON, L. (2021) : « More than
467 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. » *Science Advances*; 7:
468 eaaz5803.

469 QGIS.ORG (2022) : *QGIS Geographic Information System* : QGIS Association. Disponible en ligne :
470 <http://www.qgis.org>

471 RECH, S., MACAYA-CAQUILPÁN, V., PANTOJA, J.F., RIVADENEIRA, M.M., JOFRE MADARIAGA, D.,
472 THIEL, M. (2014) : « Rivers as a source of marine litter – A study from the SE Pacific. » *Marine Pollution
473 Bulletin*; 82: 66–75.

474 RYAN, P.G., PEROLD, V. (2021) : « Limited dispersal of riverine litter onto nearby beaches during rainfall
475 events. » *Estuarine, Coastal and Shelf Science*; 251: 107186.

476 SADRI, S.S., THOMPSON, R.C. (2014) : « On the quantity and composition of floating plastic debris entering
477 and leaving the Tamar Estuary, Southwest England. » *Marine Pollution Bulletin*; 81: 55–60.

478 SAGE (2020) : *Plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau* : Rapport du Schéma
479 d'aménagement et de gestion des eaux, Estuaire de la Loire.

480 SELLIER, D. (2012) : « Géomorphologie de l'estuaire de la Loire, éléments de vulgarisation et de
481 patrimonialisation. » *Cahiers Nantais d'Aménagement*; 1: 45–64.

482 SNPN (2008) : « Estuaires, deltas et baies. Rapport de la Société nationale de protection de la nature. »
483 *Zones Humides Infos*; 61: 32.

484 TRAMOY, R., GASPERI, J., COLASSE, L., NOUS, C., TASSIN, B. (2021) : « Transfer dynamics of
485 macroplastics in estuaries – New insights from the Seine estuary: Part 3. What fate for macroplastics? »
486 *Marine Pollution Bulletin*; 169: 112513.

487 TRAMOY, R., GASPERI, J., COLASSE, L., SILVESTRE, M., DUBOIS, P., NOUS, C., TASSIN, B. (2020a) : «
488 Transfer dynamics of macroplastics in estuaries – New insights from the Seine estuary: Part 2. Short-term
489 dynamics based on GPS-trackers. » *Marine Pollution Bulletin*; 160: 111566.

490 TRAMOY, R., GASPERI, J., COLASSE, L., SILVESTRE, M., DUBOIS, P., NOUS, C., TASSIN, B. (2020b) : «
491 Transfer dynamics of macroplastics in estuaries – New insights from the Seine estuary: Part 2. Short-term
492 dynamics based on GPS-trackers. » *Marine Pollution Bulletin*; 160: 111566.

493 VAN CALCAR, C.J., VAN EMMERIK, T.H.M. (2019) : « Abundance of plastic debris across European and
494 Asian rivers. » *Environmental Research Letters*; 14: 124051.

495 VAN EMMERIK, T., MELLINK, Y., HAUKE, R., WALDSCHLÄGER, K., SCHREYERS, L. (2022) : « Rivers as
496 plastic reservoirs. » *Frontiers in Water*; 3: 786936.

497 VAN EMMERIK, T., ROEBROEK, C., DE WINTER, W., VRIEND, P., BOONSTRA, M., HOUGEE, M. (2020a)
498 : « Riverbank macrolitter in the Dutch Rhine–Meuse delta. » *Environmental Research Letters*; 15: 104087.

499 VAN EMMERIK, T., SCHWARZ, A. (2020) : « Plastic debris in rivers. » *WIREs Water*; 7: e1398.

500 VAN EMMERIK, T., VAN KLAVEREN, J., MEIJER, L.J.J., KROOSHOF, J.W., PALMOS, D.A.A.,
501 TANCHULING, M.A. (2020b) : « Manila River Mouths Act as Temporary Sinks for Macroplastic Pollution. »
502 *Frontiers in Marine Science*; 7: 545812.

503 VAN EMMERIK, T., STRADY, E., KIEU-LE, T.-C., NGUYEN, L., GRATIOT, N. (2019) : « Seasonality of
504 riverine macroplastic transport. » *Scientific Reports*; 9: 13549.

505 VERMEIREN, P., MUÑOZ, C.C., IKEJIMA, K. (2016) : « Sources and sinks of plastic debris in estuaries: A
506 conceptual model integrating biological, physical and chemical distribution mechanisms. » *Marine Pollution
507 Bulletin*; 113: 7–16.

508

Conditions initiales et finales	Durées	Distances	Vitesses	Conditions d'échouage/re mobilisation	Conditions hydrologiques et de marées
Jour et heure du lâcher et de la récupération	Durée totale (j)	Distance nette (km)	Vitesse maximum (km/h)	Nombre d'épisodes	Débit initial (m ³ /s)
Zone géographique	Durée cumulée passée dans l'eau (j)	Distance totale (km)		Zone géographique	Marnage (m)
Point kilométrique (pk)				Typologie des berges et de végétation	Marée montante ou descendante

509 **Tableau I : Paramètres de conditions initiales et finales, de durées, de distances, de vitesses, de**
510 **conditions d'échouage/remobilisation et de conditions hydrologiques et de marées relevés sur les**
511 **trajectoires acquises.**

512