

RAPPORT SCIENTIFIQUE

Caractérisation des macrodéchets plastiques flottants de la baie de Benoa à partir du navire collecteur Mobula 8

Campagne de terrain 06/2023 à 03/2024, Bali, Indonésie

Center for Remote Sensing and Ocean Sciences (CReSOS), Université Udayana
The SeaCleaners, pôle scientifique
Édition révisée et consolidée, 10/2026

The SeaCleaners Swiss

Organisation suisse d'utilité publique
www.theseacleaners.org

Auteurs et statut du document

CReSOS, Université Udayana
I Gede Hendrawan, I Made Abdi Janaguna, I Putu Ranu Fajar Maharta, Cornelia Coraima Lazaren, Ade Restiari Sudarmawan, Putra Bagus Panji Pamungkas, I Made Dharma Raharja
Enquêteurs de terrain : I Gede Putu Wahyu Pratama, Pande Putu Ardi Winata, I Gede Ivan Budi Pratama

The SeaCleaners
Gwenaële Coat, responsable scientifique (conception et coordination de l'étude)

Révision éditoriale
The SeaCleaners Swiss, 10/2026

STATUT DE CETTE ÉDITION

Cette édition reprend le rapport d'enquête scientifique établi par CReSOS et The SeaCleaners en 2024. Elle a été restructurée, traduite en français et enrichie des données opérationnelles du Mobula 8 conservées dans les archives du projet (registre de collecte 06/2023 à 12/2023, protocole annexé à l'accord de coopération, calendrier des journées d'enquête). Toutes les valeurs ont été vérifiées : les totaux ont été recalculés à partir des valeurs élémentaires et les écarts relevés sont signalés en annexe D. Les données brutes de caractérisation sont conservées par CReSOS.

L'étude a été conduite par The SeaCleaners, alors portée par l'entité française. Depuis 06/2024, The SeaCleaners Swiss, fondée en 2019, a repris l'ensemble des activités de l'association et assure la valorisation de ces travaux.

Citation suggérée : CReSOS Université Udayana et The SeaCleaners (2026). Caractérisation des macrodéchets plastiques flottants de la baie de Benoa à partir du navire collecteur Mobula 8. Campagne 06/2023 à 03/2024. Édition révisée. The SeaCleaners Swiss, Vernier.

Sommaire

Résumé

1 Introduction et objectifs

2 Zone d'étude

3 Matériel et méthodes

4 Résultats

5 Discussion

6 Limites et retour d'expérience méthodologique

7 Conclusion et perspectives

Remerciements, références et annexes

Résumé

De 06/2023 à 03/2024, CReSOS (Université Udayana) et The SeaCleaners ont conduit la première caractérisation des macrodéchets plastiques flottants de la baie de Benoa, au sud de Bali, à partir des déchets interceptés par le Mobula 8, navire collecteur conçu pour les eaux abritées.

Sept sites représentatifs des principaux milieux de la baie (mangroves, embouchure de rivière, zones portuaires, chenal, littoral touristique et eaux extérieures) ont été suivis au moyen de transects linéaires répétés, à raison de deux journées par site et par mois. Les objets de plus de 50 millimètres ont été dénombrés, classés en objets entiers ou fragments et rattachés à une liste harmonisée dérivée des référentiels CSIRO et du Centre commun de recherche européen. Au total, 3 840 objets plastiques ont été caractérisés, dont 85,7 % sous forme entière.

Les plastiques souples dominent nettement l'échantillon (environ 83 % des objets), devant les plastiques rigides (13 %). Emballages alimentaires, gobelets et couvercles, sacs en film fin et sachets constituent l'essentiel des objets identifiés ; parmi les produits reconnaissables, les emballages de snacks (258 objets), l'eau minérale (214) et les boissons instantanées (181) arrivent en tête. La répartition spatiale est très contrastée : West Benoa Harbour (L7) et le canal portuaire (L4) concentrent à eux deux plus de la moitié des objets, tandis que South Harbour (L5) en totalise moins de 4 %. Les effectifs culminent en 06/2023 et 07/2023 puis diminuent fortement, sans qu'une tendance durable puisse être établie sur une période inférieure à un cycle annuel.

En parallèle, le registre opérationnel du Mobula 8 fait état de 5 316,9 kilogrammes de plastique retirés de la baie entre 06/2023 et 12/2023, sur 105 journées de collecte. La forte proportion d'objets entiers, la nature des produits et la position des sites les plus chargés suggèrent des apports récents et largement locaux, associés aux usages urbains, portuaires et touristiques, et modulés par les courants de marée. Ces résultats constituent une première référence pour la baie et plaident pour un protocole harmonisé, reproductible sur d'autres sites d'intervention.

Mots clés : macrodéchets flottants, plastiques souples, baie de Benoa, Bali, navire collecteur, transects, caractérisation, emballages à usage unique

3 840
objets plastiques caractérisés, 06/2023 à 03/2024

83 %
de plastiques souples parmi les objets dénombrés

52 %
des objets relevés sur deux sites, L7 et L4

5 316,9
kilogrammes de plastique collectés par le Mobula 8, 06/2023 à 12/2023

LECTURE DES INDICATEURS

Les objets caractérisés proviennent d'un échantillonnage par transects : ils ne représentent ni l'ensemble des déchets collectés par le navire, ni le stock total de la baie. Les tonnages opérationnels et les dénombrements scientifiques décrivent des réalités complémentaires et ne doivent pas être additionnés.

1 Introduction et objectifs

La pollution plastique des milieux côtiers tropicaux est l'un des défis environnementaux majeurs de l'Asie du Sud Est. Selon Jambeck et collaborateurs (2015), l'Indonésie générait en 2010 environ 3,22 millions de tonnes par an de déchets plastiques mal gérés, dont 0,48 à 1,29 million de tonnes étaient susceptibles d'atteindre l'océan, ce qui la plaçait au deuxième rang mondial derrière la Chine. Si plusieurs études ont décrit les microplastiques de la baie de Benoa (Nugroho et collaborateurs, 2018 ; Suteja et collaborateurs, 2024), aucune donnée publiée ne portait, à notre connaissance, sur la distribution, l'abondance et la nature des macroplastiques flottants de la baie.

En 03/2023, The SeaCleaners a mis en service dans la baie de Benoa son premier navire collecteur, le Mobula 8, dans le cadre de sa première opération internationale. Pour documenter les déchets interceptés, l'association s'est associée au Center for Remote Sensing and Ocean Sciences (CReSOS) de l'Université Udayana, centre de recherche fondé en 2002 avec l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale et l'Agence spatiale nationale indonésienne, spécialisé dans la télédétection et l'observation des milieux côtiers et marins. Un accord de coopération signé en 05/2023 a fixé le protocole commun, le financement de l'étude par The SeaCleaners et le partage des résultats.

1.1 Objectifs

- Établir un état de référence de la nature, de l'abondance et de la distribution spatiale et temporelle des macroplastiques flottants dans la baie de Benoa.
- Identifier les catégories d'objets et les types de produits les plus fréquents afin d'éclairer la prévention à la source.
- Tester, en conditions réelles, un protocole de caractérisation compatible avec les référentiels internationaux et transposable à d'autres sites d'intervention des Mobula.

Ces objectifs s'inscrivent dans les trois axes du pôle scientifique de The SeaCleaners : quantifier la pollution plastique des milieux côtiers, fédérer une communauté de partenaires et de praticiens, et partager l'état des connaissances sur les déchets flottants en eaux côtières.

2 Zone d'étude

Bali produit environ 4 281 tonnes de déchets par jour. Selon la Bali Partnership (2019), près de 48 % sont gérés de manière responsable ; le reste est mal géré ou non collecté, et environ 11 % des déchets de l'île finissent dans les milieux aquatiques. Les apports des rivières vers la mer se concentrent sur la côte sud, où se situent les principales zones urbaines et touristiques (figure 1).



Figure 1. Fuites de plastique des rivières vers l'océan à Bali, en kilogrammes par jour. Source : Bali Partnership.

La baie de Benoa, au sud de Bali, relève des régences de Badung et de Denpasar. C'est une baie peu profonde, semi fermée et soumise à la marée, bordée de mangroves, de plages sableuses et de zones coralliennes. Elle est presque fermée au sud par l'étroite péninsule sableuse de Benoa, qui ménage l'accès au port de Benoa, très fréquenté, sur environ 1 kilomètre de large. Au nord de cette entrée, l'île de Serangan n'est séparée de Bali que par des eaux très peu profondes, larges de 400 mètres à leur point le plus étroit (Ningsih et Azhar, 2013).

Six rivières se jettent dans la baie, qui associe activités portuaires, nautisme, tourisme et zones résidentielles (Nugroho et collaborateurs, 2018). Elle est par ailleurs exposée à l'eutrophisation, aux rejets d'eaux usées non traitées et à la proximité de la décharge de Suwung.

3 Matériel et méthodes

3.1 Le navire collecteur Mobula 8

Le Mobula 8 est un catamaran de collecte, développé avec EFINOR Sea Cleaner, destiné aux eaux calmes : rivières, canaux, estuaires et ports. Il opère avec un équipage de trois personnes (un pilote et deux opérateurs) jusqu'à 5 milles nautiques des côtes par temps calme et peut être transporté par la route sur remorque. En collecte, le navire avance à 1,5 à 2 nœuds ; l'ouverture de l'étrave crée un effet d'aspiration qui dirige vers l'ouverture les déchets flottants situés 2,5 à 4 mètres en amont. Entre les deux coques, un panier retient les déchets de plus de 5 millimètres ; il est relevé après chaque transect pour un premier tri sur la table centrale.



Figure 2. Le Mobula 8 en opération dans la baie de Benoa.

Caractéristiques du Mobula 8	
Capacité de nettoyage de surface	15 000 mètres carrés par heure
Largeur de collecte	4 mètres, grâce au dispositif d'entonnement avant
Profondeur de collecte	Déchets flottants solides et liquides jusqu'à 0,4 mètre sous la surface
Stockage des déchets solides	5 à 8 mètres cubes (2 400 kilogrammes) en grands sacs
Stockage des déchets liquides	600 litres ; déchets dangereux en caissons dédiés

Tableau 1. Principales caractéristiques techniques du Mobula 8.

3.2 Sites et plan d'échantillonnage

Les sites ont été définis conjointement par les équipes scientifique et opérationnelle selon les caractéristiques de la baie (marées, courants, accessibilité dans une baie peu profonde, proximité des rivières, des ports et des mangroves). Sur chaque site, la collecte suit le même protocole : trois transects linéaires, chacun répété trois fois, réalisés exactement au même emplacement, ce qui permet de comparer les transects, les sites et les mois. Les coordonnées de départ et d'arrivée de chaque transect ont été relevées par GPS lors de la première sortie. Sept sites ont été retenus (tableau 2, figure 3).

Code	Site	Milieu	Journées par mois	Transects par journée	Contraintes d'accès
L1	Serangan	Eaux ouvertes et mangroves	2	3	Marée, passage du pont
L2	Rangda	Rivière	2	3	Identiques à L1
L3	Harbour	Port de Benoa et port de pêche	2	3	Aucune
L4	Harbour canal	Chenal reliant la baie au large	2	3	Trafic maritime
L5	South Harbour	Pointe de Nusa Dua	2	3	Marée
L6	Outside Benoa	Eaux extérieures	Opportuniste	3	Météo
L7	West Benoa Harbour	Port de pêche, secteur ouest	2	3	Trafic maritime

Tableau 2. Sites de suivi de la baie de Benoa et plan d'échantillonnage.

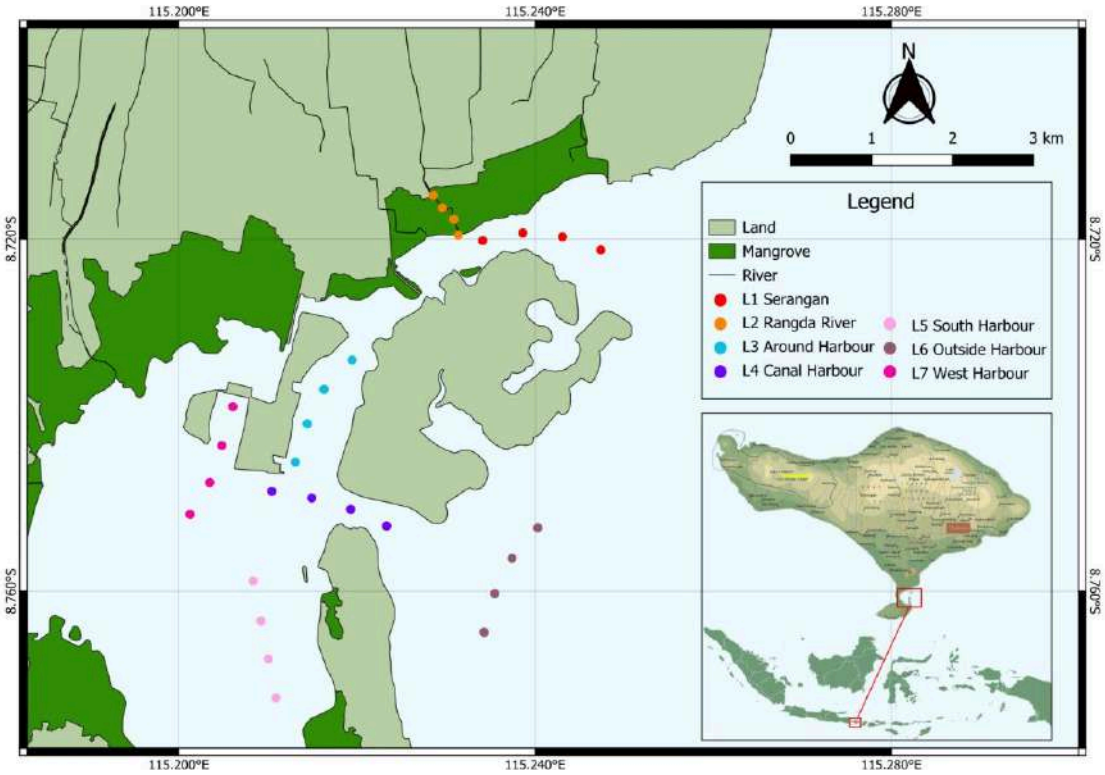


Figure 3. Localisation des transects dans la baie de Benoa (L1 Serangan, L2 rivière Rangda, L3 port, L4 canal portuaire, L5 South Harbour, L6 extérieur de la baie, L7 West Harbour). Source : CReSOS.

3.3 Calendrier

La campagne s'est déroulée de 06/2023 à 03/2024, soit dix mois couvrant la saison sèche (juin à août) et la saison humide (décembre à février). Les journées d'enquête étaient planifiées chaque mois en fonction des horaires de marée, avec des fenêtres de collecte de trois à six heures par site. Le calendrier effectivement réalisé, reconstitué à partir des fichiers de données, figure en annexe A : certains sites n'ont pas pu être échantillonnés certains mois en raison des arrêts techniques du navire, de la météo ou des contraintes de navigation.

3.4 Caractérisation des déchets

Les déchets de chaque transect étaient conservés séparément, étiquetés puis caractérisés à terre par les enquêteurs de CReSOS. Les objets de plus de 50 millimètres ont été dénombrés selon une liste prédéfinie adaptée des fiches CSIRO (version 1.3) et de la liste commune du Centre commun de recherche européen (annexe B), en distinguant objets entiers et fragments, et répartis en huit catégories : plastiques rigides, plastiques souples, sangles et liens, caoutchouc, mousses, engins de pêche, divers et autres. Chaque catégorie a été pesée et son volume estimé ; les marques identifiables ont été relevées. La catégorie « autres », qui comprend des objets non nécessairement plastiques, est exclue des analyses.

3.5 Données opérationnelles associées

En dehors des transects, l'équipage du Mobula 8 tenait un registre quotidien de collecte : zone, horaires, présence des enquêteurs à bord et poids des déchets par famille de matériaux (organique, plastique, textile, verre, métal, papier, bois, caoutchouc, autres). Ce registre, disponible de 06/2023 à 12/2023, est utilisé ici pour décrire l'effort de collecte. Il comprend également une colonne dédiée au poids des plastiques prélevés sur les transects, exploitée à la section 4.6.

3.6 Traitement et contrôle des données

Les effectifs mensuels par site et par forme proviennent du rapport d'enquête de CReSOS. Pour cette édition, les totaux ont été recalculés à partir des valeurs élémentaires et rapprochés des fichiers de saisie disponibles. Les pourcentages par catégorie sont repris du rapport d'origine. Une analyse par modèles additifs généralisés, destinée à modéliser la relation non linéaire entre le temps et la concentration en déchets par site, est en cours de préparation par CReSOS en vue d'une publication.

4 Résultats

4.1 Effort de collecte et volumes opérationnels

Le navire a commencé ses opérations régulières en 06/2023. De 06/2023 à 12/2023, le registre recense 105 journées de collecte sur environ 150 journées théoriquement possibles, dont 42 avec des enquêteurs de CReSOS à bord. Les autres journées ont été perdues pour cause de maintenance, de météo, de contraintes de navigation ou de jours fériés ; le navire a notamment été immobilisé la majeure partie de 11/2023 pour un carénage. Sur cette période, 5 316,9 kilogrammes de plastique ont été enregistrés, pour 14 754,4 kilogrammes de matières au total, dont près de 9 tonnes de matières organiques (figure 4).

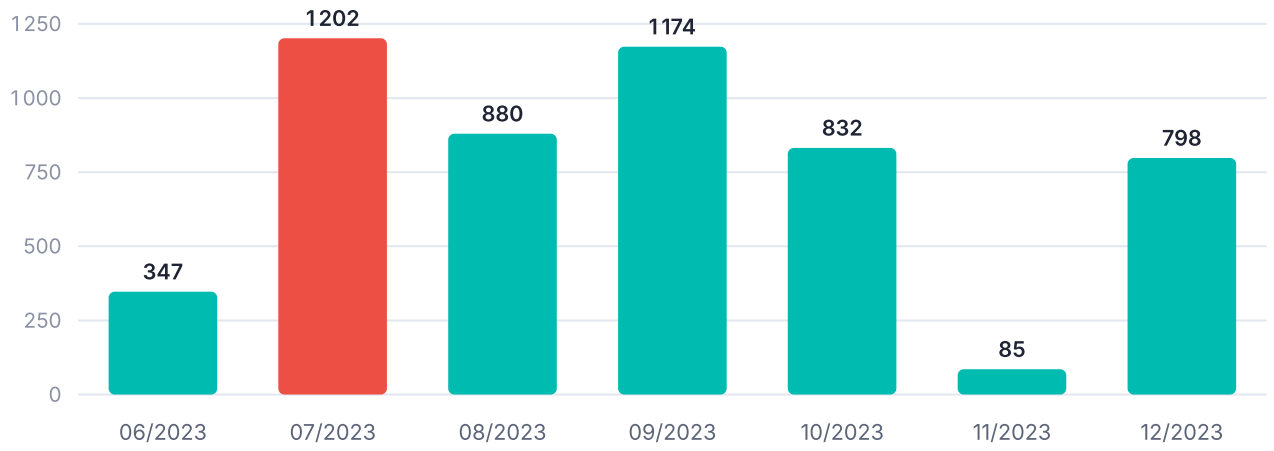


Figure 4. Plastique collecté chaque mois par le Mobula 8, en kilogrammes (registre opérationnel, 06/2023 à 12/2023). Le creux de 11/2023 correspond à l'immobilisation du navire.

Mois	06/2023	07/2023	08/2023	09/2023	10/2023	11/2023	12/2023	Total
Plastique (kilogrammes)	347,2	1 201,8	879,9	1 173,5	831,8	85,0	797,7	**5 316,9**
Toutes matières (kilogrammes)	628,6	8 030,3	3 068,4	1 300,6	837,8	86,0	802,7	**14 754,4**
Journées de collecte	13	18	19	16	15	5	19	**105**
Journées avec enquêteurs	1	4	9	8	6	4	10	**42**

Tableau 3. Synthèse mensuelle du registre opérationnel. En 06/2023, les matières organiques ont été comptées en sacs et non pesées : le total de ce mois est sous estimé.

La collecte de plastique varie fortement d'un mois à l'autre. Ces variations sont compatibles avec les changements saisonniers de vent et de courant (à partir de 11/2023, les vents poussent les déchets vers l'ouest, hors de portée du navire) et avec les arrêts d'exploitation ; les données ne permettent toutefois pas d'attribuer un effet précis à chacun de ces facteurs, ni d'en déduire une diminution durable de la pollution.

4.2 Abondance et forme des objets

Sur l'ensemble de la campagne et des sept sites, 3 840 objets plastiques ont été caractérisés (hors catégorie « autres »). Les objets entiers dominent largement : 3 289 objets, soit 85,7 %, contre 551 fragments (14,3 %).

4.3 Composition par catégorie

Les plastiques souples constituent la catégorie dominante, avec 85 % des objets entiers et 72 % des fragments ; tous objets confondus, ils représentent environ 83 % de l'échantillon. Les plastiques rigides arrivent en second (13 % des objets entiers comme des fragments). Mousses, caoutchouc, sangles et objets divers restent marginaux, mais sont proportionnellement plus présents parmi les fragments, plus diversifiés que les objets entiers (figure 5).

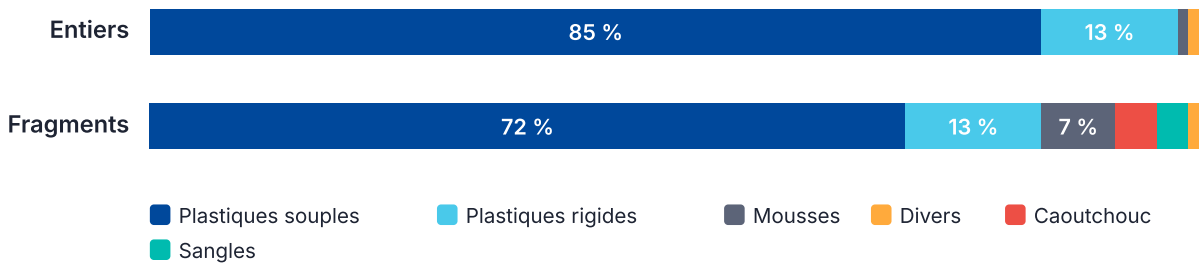


Figure 5. Composition des objets entiers et des fragments par catégorie, en pourcentage du nombre d'objets (06/2023 à 03/2024).

En moyenne par site, les plastiques souples passent de 78 objets en 06/2023 à un maximum de 125 objets en 07/2023, puis diminuent progressivement. Les plastiques rigides passent de 18 objets en moyenne par site en 06/2023 à 1 seul objet en 02/2024. Les plastiques souples sont la catégorie dominante neuf mois sur dix (tableau 4) ; seul le mois de 06/2023 voit apparaître les plastiques rigides parmi les dix ensembles les plus fréquents, au canal portuaire (L4), avec des bouchons et couvercles.

Mois	Objets	Catégorie	Site le plus chargé	Objets principaux
07/2023	877	Plastiques souples	L7	Emballages alimentaires, autres souples
06/2023	543	Plastiques souples	L4	Emballages alimentaires, gobelets et couvercles
09/2023	363	Plastiques souples	L4	Emballages alimentaires, autres souples
08/2023	302	Plastiques souples	L4	Emballages alimentaires, autres souples
12/2023	264	Plastiques souples	L2	Sacs en film fin, gobelets et couvercles
01/2024	218	Plastiques souples	L2	Sacs en film fin, autres souples
10/2023	202	Plastiques souples	L4	Emballages alimentaires, gobelets et couvercles
03/2024	197	Plastiques souples	L7	Emballages alimentaires, autres souples
06/2023	126	Plastiques rigides	L4	Bouchons et couvercles, autres rigides
11/2023	117	Plastiques souples	L1	Sacs en film fin, autres souples

Tableau 4. Les dix ensembles mois et catégorie les plus fréquents. La colonne « objets » indique le total mensuel de la catégorie, tous sites confondus ; le site indiqué est celui où la catégorie est la plus abondante ce mois là.

4.4 Distribution spatiale

La répartition des objets entre sites est très contrastée (figure 6). West Benoa Harbour (L7), au contact du port de pêche, totalise 1103 objets (28,7 %), devant le canal portuaire (L4) avec 899 objets (23,4 %) et la rivière Rangda (L2) avec 613 objets. À l'inverse, South Harbour (L5), à la pointe de Nusa Dua, ne totalise que 149 objets, soit moins de 4 % de l'échantillon.

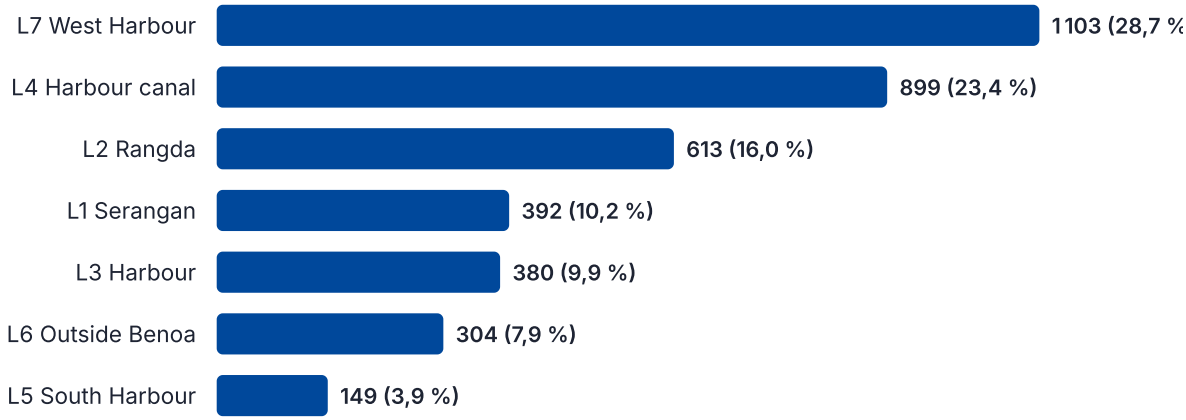


Figure 6. Nombre total d'objets caractérisés par site et part dans l'échantillon (06/2023 à 03/2024). L'effort d'échantillonnage n'est pas strictement identique entre sites (annexe A).

4.5 Variabilité temporelle

Les effectifs culminent en début de campagne (figure 7). Les objets entiers atteignent leur maximum en 07/2023 (861 objets), principalement à L7 (294), L2 (178), L1 (134) et L4 (133) ; les fragments culminent en 06/2023 (231 fragments), essentiellement au canal portuaire (L4, 156 fragments). Les effectifs chutent ensuite nettement, avec des hausses ponctuelles en 09/2023 et 12/2023 ; la hausse des fragments en 12/2023 provient surtout de la rivière Rangda (L2). En 03/2024, les effectifs sont plus faibles et plus homogènes entre sites.

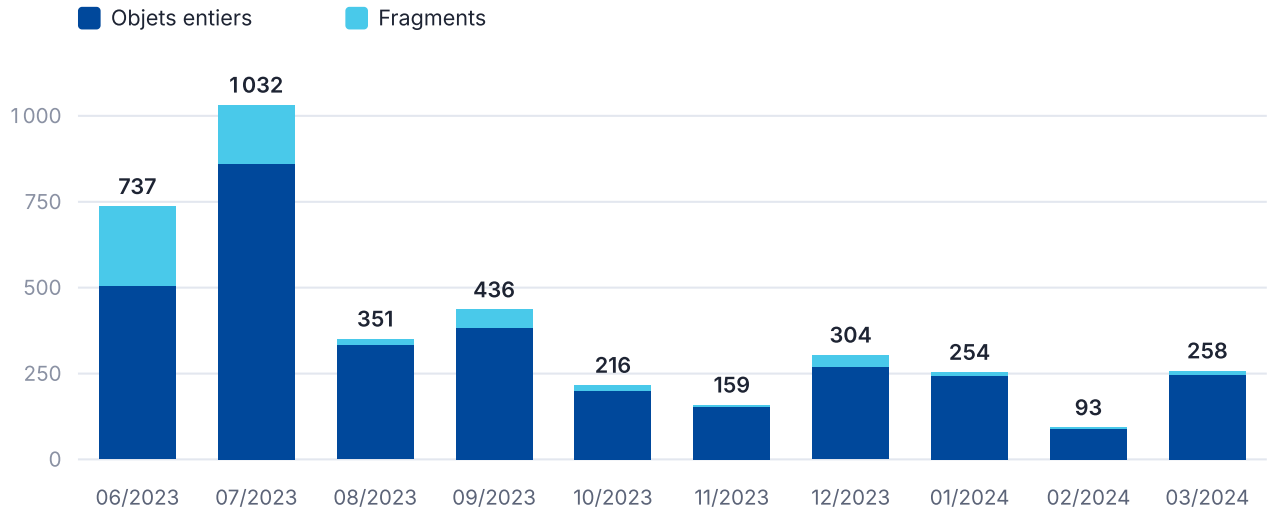


Figure 7. Nombre d'objets caractérisés par mois, tous sites confondus, selon la forme.

Mois	Forme	Site							Total
		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	
06/2023	Fragments	0	0	3	156	0	34	38	**231**
	Entiers	0	0	30	**197**	0	129	**150**	**506**
07/2023	Fragments	47	6	30	31	0	0	57	**171**
	Entiers	134	**178**	120	133	0	2	**294**	**861**
08/2023	Fragments	0	0	6	10	0	0	0	**16**
	Entiers	0	0	66	124	11	4	130	**335**
09/2023	Fragments	9	0	10	15	7	8	5	**54**
	Entiers	57	49	22	55	50	29	120	**382**
10/2023	Fragments	0	0	3	11	2	1	0	**17**
	Entiers	0	0	14	79	31	15	60	**199**
11/2023	Fragments	0	0	2	2	0	0	0	**4**
	Entiers	52	44	14	45	0	0	0	**155**
12/2023	Fragments	1	23	0	2	0	2	5	**33**
	Entiers	28	103	26	16	18	17	63	**271**
01/2024	Fragments	2	5	1	0	1	0	0	**9**
	Entiers	22	101	11	14	9	9	79	**245**
02/2024	Fragments	0	3	0	0	0	1	1	**5**
	Entiers	4	45	4	1	0	9	25	**88**
03/2024	Fragments	0	0	1	0	0	4	6	**11**
	Entiers	36	56	17	8	20	40	70	**247**
Total par site		**392**	**613**	**380**	**899**	**149**	**304**	**1 103**	**3 840**

Tableau 5. Nombre d'objets par mois, par site et par forme dans la baie de Benoa (valeurs CReSOS). En rouge, les valeurs supérieures ou égales à 150 objets. Les totaux sont recalculés à partir des valeurs élémentaires (voir annexe D).

4.6 Types de produits

L'identification du type de produit d'origine permet de relier les déchets observés aux usages qui les génèrent et d'orienter la prévention. Les objets identifiés relèvent pour l'essentiel de quelques formes : bouteilles, bouchons, gobelets, étiquettes détachées, emballages et sachets, cette dernière forme étant la plus fréquente. Quatre types de produits dominent, tous sous forme d'objets entiers : les snacks (258 objets), l'eau minérale (214), les boissons instantanées (181) et les nouilles instantanées (108). Viennent ensuite, en effectifs beaucoup plus faibles, les confiseries, les assaisonnements, les glaces, les détergents et les boissons gazeuses, puis des produits d'hygiène et d'entretien (shampooing, lingettes, couches, médicaments).

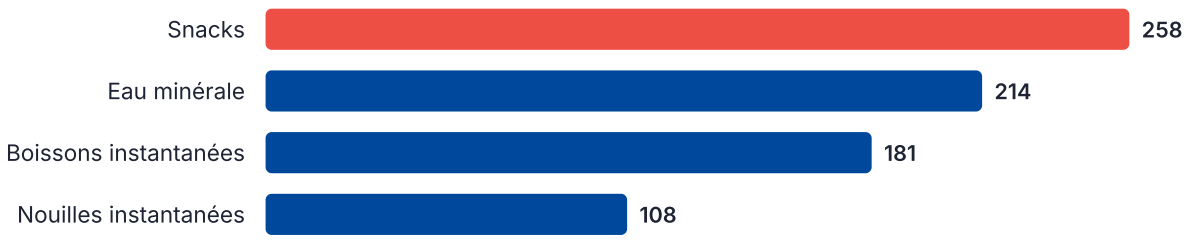


Figure 8. Les quatre types de produits les plus fréquents, en nombre d'objets.

Produit	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	Total
Snacks	14	45	21	**72**	18	19	69	**258**
Eau minérale	16	26	17	46	8	30	**71**	**214**
Boissons instantanées	23	**40**	16	32	5	25	**40**	**181**
Nouilles instantanées	10	21	7	**27**	6	11	26	**108**

Tableau 6. Types de produits les plus fréquents par site (en rouge, le site le plus chargé).

Snacks et eau minérale se concentrent à L4 et L7, qui présentent l'accumulation de produits la plus élevée. À Serangan (L1), les boissons instantanées arrivent en tête (23 objets) ; à la rivière Rangda (L2) et autour du port (L3), les snacks dominent ; à l'extérieur de la baie (L6) comme à West Harbour (L7), l'eau minérale est le premier produit (30 et 71 objets). Le détail par site figure dans le rapport d'origine ; le relevé des marques, confidentiel au sens de l'accord de coopération, n'est pas publié ici (annexe C).

4.7 Masse des plastiques échantillonnés

Le registre opérationnel consigne le poids des plastiques prélevés sur les transects de 06/2023 à 12/2023 : 28,7 kilogrammes au total, dont 10,0 à West Harbour (L7) et 6,9 au canal portuaire (L4). Rapporté aux 3 235 objets dénombrés sur la même période, cela correspond à une masse moyenne indicative d'environ 9 grammes par objet, cohérente avec la prédominance d'emballages légers. Cette valeur doit être interprétée avec prudence, la pesée n'ayant pas été systématiquement appariée aux dénombrements.

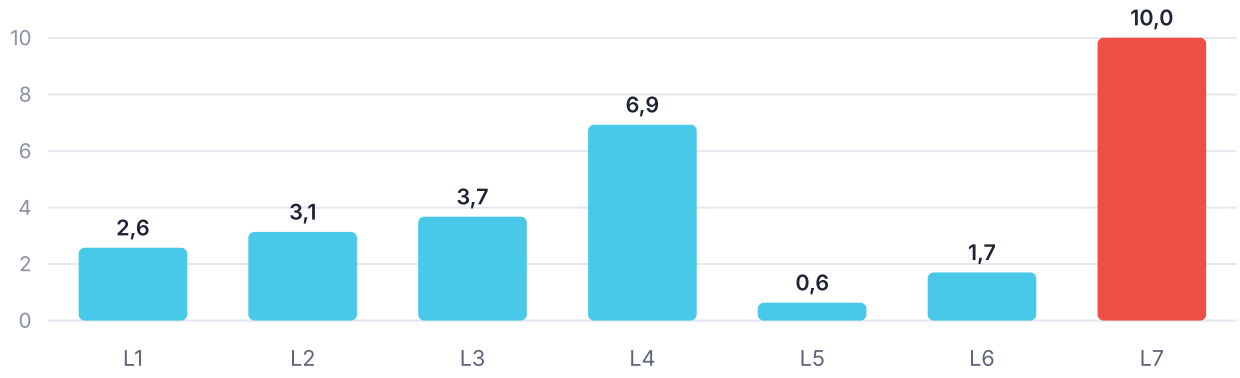


Figure 9. Masse de plastique prélevée sur les transects par site, en kilogrammes (06/2023 à 12/2023).

5 Discussion

5.1 Une pollution dominée par les emballages à usage unique

Les plastiques souples, majoritairement issus d'emballages à usage unique (sachets, emballages alimentaires, sacs, gobelets), constituent la première catégorie de macrodéchets flottants dans la baie de Benoa, sous forme entière comme fragmentée. Les déchets de ce type (bouteilles, emballages, sacs, gobelets, assiettes, couverts, pailles, voire tongs) sont associés aux activités touristiques, mais aussi aux usages domestiques (Maione, 2019). Les contenants alimentaires et les plastiques fins proviennent majoritairement des zones urbaines (Barnes et collaborateurs, 2009), ce qui concorde avec la forte densité de population autour de la baie. Plastiques souples et rigides dominent également les zones côtières de Bali selon Hendrawan et collaborateurs (2019), ce qui indique que ces déchets restent insuffisamment gérés dans plusieurs territoires et activités de l'île.

Zone	Déchet dominant	Source
Baie de Benoa, Bali	**Plastiques souples (83 %)**	**Cette étude**
Côte de Kuri, régence de Maros, Sulawesi du Sud	Plastiques souples (40,51 %)	Sahara et collaborateurs (2020)
Eaux de Pemuteran et Padang Bai, Bali	Plastiques souples (40 %) et rigides (15 %)	Putra et collaborateurs (2023)
Plage Le Grandeur, Balikpapan, Kalimantan oriental	Plastiques (45 %)	Ardan et collaborateurs (2022)
Sanctuaire Pelagos, Méditerranée	Mésoplastiques (78,5 %) et macroplastiques (83,4 %)	Fossi et collaborateurs (2017)
Île de Sebatik, Sabah	Plastiques (41,7 %)	Estim et Sudirman (2017)

Tableau 7. Comparaison avec d'autres études sur les déchets marins. Les protocoles (milieu, taille minimale, unité) diffèrent : la comparaison est indicative.

5.2 Des apports récents et largement locaux

La forme et la taille des déchets dépendent du temps passé dans l'environnement et de leur état à l'entrée dans le milieu. Les déchets se fragmentant avec le temps, la part de fragments augmente avec l'âge de la pollution (Andrady, 2011 ; Zarfl et collaborateurs, 2011). La forte proportion d'objets entiers observée ici (près de 86 %) suggère donc que les déchets flottants de la baie y sont entrés récemment et proviennent en grande partie de sources locales. Les objets plus grands et plus flottants peuvent par ailleurs être transportés plus loin que les petits, qui tendent à couler avant de se disperser (Fazey et Ryan, 2016) ; les déchets dominants étant des plastiques moins denses que l'eau de mer (Ryan, 2015), ils se répartissent facilement dans l'ensemble de la baie.

5.3 Facteurs de la distribution spatiale

L'accumulation à West Harbour (L7) peut être reliée aux activités du port de pêche, aux usages touristiques et à une gestion insuffisante des déchets autour de la baie : usage intensif d'emballages, infrastructures de gestion limitées et habitudes de consommation (Dinas Lingkungan Hidup, 2022 ; Waste4Change, 2022). Le canal portuaire (L4), à l'entrée de la baie, est l'une des zones les plus profondes et où les courants sont les

plus rapides (Suteja et collaborateurs, 2021) ; ce goulet relie la baie au large et concentre les flux, ce qui contribue vraisemblablement à la forte présence de déchets.

À l'inverse, South Harbour (L5), proche de Tanjung Benoa et de ses nombreuses activités nautiques (jet ski, parachute ascensionnel, plongée ; Astina et Muliadiasa, 2018 ; Kardini et Sudiartini, 2020), présente de faibles effectifs. À marée haute, le courant porte principalement de Tanjung Benoa vers l'intérieur de la baie (Al Tanto et collaborateurs, 2017), ce qui coïncide avec les conditions de nombreuses sorties et peut expliquer la faible accumulation à L5.

5.4 Variabilité temporelle

Les pics de 06/2023 et 07/2023 coïncident avec la haute saison touristique et la saison sèche, tandis que la baisse observée à partir de 10/2023 correspond au changement de régime des vents de mousson, qui repousse les déchets vers l'ouest. Suryawan et collaborateurs (2021) ont décrit une baisse de la production de déchets marins au sud de Bali entre 2013 et 2019, possiblement liée à de meilleures pratiques de gestion ou aux fluctuations de la fréquentation touristique. La campagne ne couvrant pas un cycle annuel complet, ces observations ne permettent pas de conclure à une tendance : un suivi sur au moins douze mois serait nécessaire pour vérifier si les mois d'avril et de mai présentent une hausse similaire.

5.5 Implications pour la prévention

Les dix ensembles les plus fréquents relèvent tous de la consommation courante : la sensibilisation du public, la réduction des emballages et une meilleure gestion à la source sont donc des leviers prioritaires. Le cadre réglementaire existe : le règlement du gouverneur de Bali numéro 97 de 2018 interdit les sacs plastiques, le polystyrène et les pailles à usage unique, et le règlement numéro 47 de 2019 impose le tri à la source. L'identification des produits les plus fréquents offre en outre une base de dialogue entre autorités, entreprises et associations pour réduire l'usage du plastique à usage unique et favoriser l'écoconception.

REPÈRES SUR LA GESTION DES DÉCHETS À BALI

- Les 16 millions de touristes annuels (6 millions internationaux et 10 millions nationaux) produisent 3,5 fois plus de déchets par jour qu'un résident et représentent 13 % des déchets de l'île.
- 87 % des résidents se déclarent prêts à trier leurs déchets.
- Cibler 15 des 57 sous districts de Bali permettrait de réduire de 44 % les plastiques rejetés en mer.
- Plus de 400 organisations communautaires, privées, publiques, culturelles et religieuses agissent déjà dans le nettoyage, l'éducation, la collecte et le recyclage.

Source : Bali Partnership (2019).

6 Limites et retour d'expérience méthodologique

Cette étude constituait le premier projet du pôle scientifique de The SeaCleaners associant un navire Mobula à une caractérisation détaillée. Le partenariat avec l'Université Udayana, fondé sur une confiance réciproque, a été efficace et la qualité des données produites par l'équipe de CReSOS est à souligner. Plusieurs limites encadrent néanmoins la portée des résultats.

6.1 Limites de l'étude

- **Durée** : dix mois de suivi ne couvrent pas un cycle annuel complet.
- **Effort inégal** : les indisponibilités du navire, la météo et les contraintes de navigation ont empêché l'échantillonnage de certains sites certains mois (annexe A) ; les comparaisons entre sites portent sur des totaux et non sur des densités normalisées par surface.
- **Part du plastique dans l'ensemble des déchets** : l'application de saisie prévue (ArcGIS QuickCapture), qui devait enregistrer en continu la position du navire et classer chaque objet collecté selon les huit catégories OSPAR, n'a pas pu être utilisée. Le jeu de données ne permet donc pas d'établir la part des plastiques parmi les autres familles de déchets.
- **Imagerie** : les vols de drone multispectral prévus pour valider des données satellitaires (projet Eyes on Plastics de l'Agence spatiale européenne, avec EOMAP) n'étaient autorisés que sur deux sites en raison de la proximité de l'aéroport et n'ont finalement pas pu être réalisés.
- **Masse et volume** : les pesées par catégorie n'ont pas été consolidées pour l'ensemble de la campagne ; les données de masse présentées sont indicatives.
- **Facteurs externes** : des travaux de dragage ont rendu certaines navigations dangereuses, et des fumées liées à un incendie de la décharge proche de la marina ont perturbé les opérations.

6.2 Enseignements pour les prochaines campagnes

- Organiser des rencontres en présentiel entre partenaires pour chaque volet du projet (science, éducation, opérations) dès sa conception.
- Définir objectifs, indicateurs d'impact et rôles avec l'ensemble des partenaires, internes et externes, et formaliser un protocole de communication entre équipage, équipe opérationnelle et équipe scientifique.
- Réserver explicitement le temps du navire dédié à la science et prévoir un lieu de tri adapté à la caractérisation.
- Tenir des points d'étape au lancement, à mi parcours et en fin de projet, et respecter les jalons d'analyse (validation du protocole après le premier mois, analyse par saison).
- Harmoniser la saisie des données dès le départ et croiser systématiquement journées d'enquête et registre de collecte pour le contrôle qualité.

7 Conclusion et perspectives

Cette campagne a représenté plusieurs premières pour The SeaCleaners : première collecte avec un Mobula, première opération internationale, premier partenariat avec l'Université Udayana et première étude des macroplastiques flottants de la baie de Benoa. Elle fournit un jeu de données original sur la nature, la distribution et la dynamique des macroplastiques de la baie, qui constitue une base solide pour la suite.

Trois perspectives se dégagent :

- améliorer l'efficacité de la collecte en combinant détection satellitaire, données de terrain et modélisation statistique (modèles additifs généralisés) pour prévoir les zones et les périodes d'accumulation ;
- faire évoluer les comportements autour de la baie, y compris dans le secteur touristique, par une éducation ciblée conduite avec les départements de psychologie et de communication de l'Université Udayana ;
- réduire durablement la densité de déchets en combinant collecte, connaissance des sources, éducation des communautés et travail avec les autorités locales.

Ce retour d'expérience nourrit aujourd'hui la stratégie scientifique de The SeaCleaners Swiss, accompagnée par son conseil scientifique international et le Professeur I Gede Hendrawan : harmoniser les méthodes de collecte et de caractérisation pour aboutir à un standard commun, comparable d'un site à l'autre, en Malaisie comme en Indonésie, et l'étendre aux nouveaux systèmes de collecte que l'organisation prévoit de déployer.

POURSUIVRE LA RECHERCHE APPLIQUÉE

Produire des données ouvertes, comparables et publiées sur les déchets flottants exige un engagement dans la durée. Institutions de recherche, fondations, entreprises et pouvoirs publics qui partagent cette exigence de rigueur et de transparence sont invités à rejoindre ce programme, comme partenaires scientifiques ou comme soutiens.

The SeaCleaners Swiss · Route de Peney 91, 1214 Vernier, Suisse · www.theseacleaners.org

Remerciements

Cette étude n'aurait pas été possible sans l'équipe de CReSOS, qui a travaillé avec rigueur pendant la campagne, la rédaction du rapport et la préparation de la publication ; Bali Marine Service et l'équipage du Mobula 8, pour la collecte des déchets et des données ; Ketut Sudarwata et Antoine Iché, pour les opérations de The SeaCleaners à Bali ; Gwenaële Coat, responsable scientifique, pour la conception et la coordination de l'étude ; et l'ensemble des personnes de The SeaCleaners qui ont rendu ce travail possible.

Références

Al Tanto T., Wisha U. J., Kusumah G., Pranowo W. S., Husrin S., Ilham I., Putra A. (2017). Karakteristik arus laut perairan Teluk Benoa, Bali. Jurnal Ilmiah Geomatika, 23(1), 37.

Andrady A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 62(8), 1596 à 1605.

Ardan A., Rafi'i A., Ghitarina G. (2022). Identifikasi sampah laut makro di Pantai Le Grandeur Kota Balikpapan Kalimantan Timur. Jurnal Tropical Aquatic Sciences, 1(2), 16 à 22.

Astina M. A., Muliadiasa K. (2018). Kajian produk wisata bahari Pantai Tanjung Benoa. Jurnal Ilmiah Hospitality Management, 8(2), 11 à 22.

Bali Partnership (2019). Workshop kerjasama pengelolaan sampah plastik pesisir dan laut. Kantor Gubernur Bali. Données consultées sur balipartnership.org le 17/06/2024.

Barnes D. K. A., Galgani F., Thompson R. C., Barlaz M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 364, 1985 à 1998.

Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Buleleng (2022). Sampah plastik di sekitar kita: antara kebutuhan dan masalah yang ditimbulkan. Consulté le 17/06/2024.

Estim A., Sudirman R. (2017). Types and abundance of macro and micro marine debris at Sebatik Island, Tawau, Sabah. Borneo Journal of Marine Science and Aquaculture, 1, 57 à 64.

Fazey F. M. C., Ryan P. G. (2016). Debris size and buoyancy influence the dispersal distance of stranded litter. Marine Pollution Bulletin, 110(1), 371 à 377.

Fossi M. C., Romeo T., Baini M., Panti C., Marsili L., Campani T., Canese S., Galgani F., Druon J. N., Airoldi S., Taddei S. (2017). Plastic debris occurrence, convergence areas and fin whales feeding ground in the Mediterranean marine protected area Pelagos Sanctuary: a modeling approach. Frontiers in Marine Science, 4, 167.

Hendrawan I. G., Karidewi M. P., Pratama G. I. P., Maharta I. P. R. F., Adibhusana M. N. (2019). Survey dan monitoring sampah laut pesisir Bali. WWF Indonesia, Denpasar, 56 pages.

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(6223), 768 à 771.

Kardini N. L., Sudiartini N. W. A. (2020). Faktor yang mempengaruhi daya tarik wisatawan dalam pengembangan pariwisata bahari di Pantai Tanjung Benoa. Jurnal Ilmiah Satyagraha, 3(1), 106 à 125.

Maione C. (2019). Emergence of plastic pollution on tourism beaches in Zanzibar, Tanzania. School for Environment and Sustainability, University of Michigan, 25 pages.

Ningsih N. S., Azhar M. A. (2013). Modelling of hydrodynamic circulation in Benoa Bay, Bali. Journal of Marine Science and Technology, 18, 203 à 212.

Nugroho D. H., Restu I. W., Ernawati N. M. (2018). Kajian kelimpahan mikroplastik di perairan Teluk Benoa Provinsi Bali. Current Trends in Aquatic Science, 1(1), 80 à 88.

Putra I. P. T. B., Hendrawan I. G., Karang I. W. G. A. (2023). Konsentrasi makroplastik pada ekosistem terumbu karang di perairan pesisir Pemuteran dan Padang Bai. Journal of Marine Research and Technology.

Ryan P. G. (2015). Does size and buoyancy affect the long distance transport of floating debris? Environmental Research Letters, 10, 084019.

Sahara R. A., Shaikh A. R., Hamsiah H. (2020). Pemetaan pola sebaran sampah berdasarkan jenis di wilayah pesisir Pantai Kuri Kabupaten Maros Sulawesi Selatan. Journal of Indonesian Tropical Fisheries.

Suryawan I. W. K., Sarwono A., Septiariva I. Y., Lee C. H. (2021). Evaluating marine debris trends and the potential of incineration in the context of the COVID 19 pandemic in Southern Bali, Indonesia. Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan, 13(2), 190 à 198.

Suteja Y., Purwiyanto A. I. S., Purbonegoro T., Cordova M. R. (2024). Spatial and temporal trends of microplastic contamination in surface sediment of Benoa Bay: an urban estuary in Bali, Indonesia. Marine Pollution Bulletin, 202, 116357.

Waste4Change (2022). Bahaya sampah plastik kemasan sachet yang sulit didaur ulang. Consulté le 17/06/2024.

Zarfl C., Fleet D., Fries E., Galgani F., Gerdts G., Hanke G., Matthies M. (2011). Microplastics in oceans. Marine Pollution Bulletin, 62(8), 1589 à 1591.

Annexes

A Calendrier des journées d'enquête

Mois	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
06/2023	·	·	21, 22	19, 20	·	26, 27	21, 22
07/2023	03, 04	17, 18	05, 06	14, 25	20, 31	27, 28	12, 13
08/2023	·	·	09, 10	09, 10	15, 18	14, 21	07, 08
09/2023	14, 15	14, 15	12, 13	12, 13	18, 19	22, 25	20, 21
10/2023	·	·	11, 12	11, 12	16, 17	09, 10	18, 19
11/2023	27, 28	27, 28	29, 30	29, 30	·	·	·
12/2023	12, 13	12, 13	04, 05	04, 05	14, 15	08, 11	06, 07
01/2024	17, 18	17, 18	08, 09	08, 09	10, 11	12, 15	19, 22
02/2024	23, 26	23, 26	12	12	·	21, 22	20
03/2024	non consolidé	non consolidé	non consolidé	non consolidé	non consolidé	non consolidé	non consolidé

Jours du mois au cours desquels chaque site a été échantillonné, reconstitués à partir du fichier de saisie CReSOS (« Data for Sat Det »). Un point indique l'absence d'enquête ; les dates de 03/2024 ne figurent pas dans ce fichier.

B Liste de caractérisation des objets

Catégorie	Objets
Plastiques rigides	Tuyau en PVC ; bouteille de boisson de moins de 1 litre ; autre bouteille ; bouchon et couvercle ; contenant alimentaire ; ustensile, assiette, bol ; briquet ; bâtonnet de sucette ou coton tige ; flacons de soins et cosmétiques ; bidons d'huile moteur ; jerricans ; fibre de verre ; flotteurs hors pêche ; jouets ; autres rigides
Plastiques souples	Sac en film fin ; emballage alimentaire et étiquette ; film et bâche ; gobelet et couvercle ; bouchons de produits chimiques ; bouchons non identifiés ; paille ; protections hygiéniques ; autres souples
Sangles et liens	Ficelle, corde, ruban ; feuillard ; collier de serrage ; autres
Caoutchouc	Tong ; chaussure ; élastique ; autres
Mousses	Contenant alimentaire ; gobelet, assiette, bol ; polystyrène ; autres
Engins de pêche	Filet ; ligne ; bouée et flotteur ; bâton lumineux ; caisses à poisson en polystyrène ou en plastique rigide ; autres
Divers	Pièces de bateau ; sacs de déchets ménagers ; mégots avec filtre ; granulés plastiques industriels ; autres

Liste adaptée des fiches CSIRO (version 1.3, 03/2019) et de la liste commune du Centre commun de recherche européen ; chaque objet est dénombré sous forme entière ou fragmentée. Les codes de correspondance figurent dans le protocole annexé à l'accord de coopération.

C Relevé des marques

Les marques identifiables ont été relevées à partir d'une liste de référence de produits courants en Indonésie (boissons, gobelets, emballages alimentaires et confiseries). Conformément à l'accord de coopération, ces résultats restent confidentiels tant que les partenaires n'en ont pas validé la diffusion ; ils sont conservés par CReSOS.

D Note de contrôle des données

- Le rapport d'origine indique 3 834 objets (550 fragments et 3 284 entiers). La somme des valeurs élémentaires du tableau 5 donne 3 840 objets (551 fragments et 3 289 entiers) ; l'écart de 6 objets (0,2 %) provient des totaux de 06/2023 (503 entiers indiqués contre 506) et de 08/2023 (333 contre 335) et d'une unité sur les fragments. Les valeurs recalculées sont retenues ici ; les pourcentages par catégorie, issus du rapport d'origine, ne sont pas affectés de manière significative.
- Le tableau des dix ensembles les plus fréquents du rapport d'origine présentait les totaux mensuels par catégorie comme des valeurs par site ; il a été clarifié (tableau 4). Plusieurs mentions de sites dans le texte d'origine ont été corrigées pour concorder avec les tableaux (pic des fragments à L4 et non à L7 ; ordre des produits à L6 et L7).
- Le registre opérationnel totalise 14 753,4 kilogrammes dans sa synthèse annuelle ; la feuille de 09/2023 comporte 1 kilogramme supplémentaire de la catégorie « autres », d'où le total de 14 754,4 kilogrammes retenu ici. Le décompte des journées avec enquêteurs repose sur l'indicateur de présence à bord et non sur l'existence de données de transect.
- Un fichier de saisie intermédiaire (« Data for Sat Det ») totalise 3 588 objets sans les données de 03/2024 ; ses valeurs concordent avec le rapport pour la plupart des sites et des mois. La consolidation finale du jeu de données est en cours avec CReSOS en vue de la publication.
- La référence bibliographique « NAP, 2011 » du rapport d'origine, sans rapport avec les déchets marins, a été retirée ; les références incomplètes ont été complétées ou harmonisées.