



HAL
open science

**Méthodologie de réintégration dans des schémas
d'économie circulaire de déchets rejetés,
intentionnellement ou non, dans les écosystèmes via des
indicateurs techniques, économiques et
environnementaux – Application au cas de Surabaya
(Indonésie)**

Benjamin Doualle, Alice Darondeau, Anh-Minh Navarre, Arnaud Paris,
Frederic Silvert

► **To cite this version:**

Benjamin Doualle, Alice Darondeau, Anh-Minh Navarre, Arnaud Paris, Frederic Silvert. Méthodologie de réintégration dans des schémas d'économie circulaire de déchets rejetés, intentionnellement ou non, dans les écosystèmes via des indicateurs techniques, économiques et environnementaux – Application au cas de Surabaya (Indonésie). 2022. hal-03419490v3

HAL Id: hal-03419490

<https://hal.science/hal-03419490v3>

Preprint submitted on 30 Mar 2022 (v3), last revised 23 May 2022 (v4)

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.

Rédaction Article Scientifique

Méthodologie de réintégration dans des schémas d'économie circulaire de déchets rejetés, intentionnellement ou non, dans les écosystèmes via des indicateurs techniques, économiques et environnementaux – Application au cas de Surabaya (Indonésie)

DOUALLE, Benjamin^a ; DARONDEAU, Alice^b ; NAVARRE, Anh-Minh^a ; PARIS, Arnaud^a ; SILVERT, Frederic^b

^a Capgemini Engineering – Blagnac, France – 4 avenue Didier Daurat, 31700 Blagnac

^b The SeaCleaners – La Trinité-sur-Mer, France – 10 rue de la Drisse, 56470 La Trinité-sur-Mer
contact de l'auteur : benjamin.doualle@gmail.com

RESUME

Pour faire face à la pollution des océans, fleuves et rivières par les déchets plastiques, il est nécessaire de déployer des systèmes de management de ces déchets (de la collecte à la valorisation) en complément de systèmes d'éducation et de sensibilisation à la préservation de l'environnement. Afin d'éviter tout transfert d'impact qui engendrerait de nouvelles pollutions, il est indispensable de développer des outils et méthodes permettant d'analyser avec robustesse la pertinence, d'un point de vue du développement durable, du déploiement de schémas d'économie circulaire sur les territoires les plus touchés. En utilisant des méthodes d'évaluation reconnues comme l'Analyse de Cycle de Vie, il est possible d'avoir une vision systémique de l'impact environnemental tout au long du cycle de vie des infrastructures déployées (flotte de véhicules et immobilisations). Une méthode est construite afin d'analyser économiquement des schémas d'économie circulaire pour démontrer leur éventuelle viabilité indépendamment de potentielles aides extérieures. Cet article permet donc de mettre en avant, via une étude de cas, le bénéfice environnemental obtenu tout en atteignant une faisabilité technico-économique. Cette méthodologie doit maintenant être répliquée à d'autres zones géographiques afin d'étudier l'impact du contexte local sur le déploiement de tels schémas d'économie circulaire.

Mots-clés : économie circulaire, pollution océanique, ACV, déchets plastiques, valorisation des déchets plastiques

ABSTRACT

To cope with the pollution of the oceans and rivers by plastic waste, it is necessary to deploy management systems of these types of waste (from collect to valorization) in addition to environmental education and awareness systems. To avoid a transfer of impacts, which would generate new pollution, it is necessary to develop some tools and methods to analyze with robustness the relevance, from a sustainability point of view, of the deployment of circular economy schemes in the most affected areas. By using recognized assessment methods such as Life Cycle Analysis, it is possible to have a systemic vision of the environmental impact throughout the life cycle of the deployed infrastructures (vehicle fleet and buildings). A method of economic analysis of circular economy schemes is carried out to prove their eventual viability independently of potential external funding. This article highlights, via a case study, the environmental benefit obtained while having a technical and economic feasibility. This methodology must now be replicated to other locations in order to study the impact of local context on the deployment of such circular economy schemes.

Keywords: circular economy, ocean pollution, LCA, plastic waste, valorization of plastic waste

Introduction

Plus de 8 millions de tonnes de déchets plastiques finissent actuellement dans les océans chaque année d'après la Fondation Ellen MacArthur (MacArthur 2017). Certains auteurs ont déjà mis en lumière les effets de la pollution plastique notamment sur la limite planétaire pour l'érosion de la biodiversité (Person et al. 2022). Face à cette problématique mondiale et grandissante de la pollution océanique par les déchets plastiques, l'Association The SeaCleaners (TSC) s'est donnée pour mission de préserver les océans en luttant contre ce type de pollution. L'implantation de boucles de gestion des déchets plastiques que l'on nommera «schéma d'économie circulaire» (collecte/tri/valorisation) sur les territoires fortement touchés par la pollution plastique est un projet qui permettra de nettoyer les océans des déchets flottants tout en valorisant les déchets collectés. Le but est de collecter les déchets plastiques dans les rivières, les fleuves et les estuaires avant qu'ils n'atteignent les océans, qu'ils ne se dégradent ou se dispersent, par des équipements spécifiques (des bateaux de collecte) développés par le bureau d'études rattaché à TSC. La collecte des déchets plastiques à terre sera également organisée en mettant en place un système de collecte par camions. L'ensemble de ces déchets (provenant des zones aquatiques et des zones terrestres) sera acheminé vers un centre de tri. Une fois triés, les déchets seront valorisés de deux façons différentes : la valorisation matière (par des solutions locales de recyclage) ou la valorisation énergétique (via une unité de valorisation énergétique convertissant les déchets en électricité).

L'une des problématiques liées à la construction d'un tel schéma d'économie circulaire est d'assurer sa viabilité aussi bien économique qu'environnementale. Une étude de l'état de l'art montre que les techniques permettant de répondre à cette problématique sont quasi-inexistantes (Borrelle et al. 2020). Ainsi, il est apparu nécessaire de développer une méthode d'analyse afin de considérer des paramètres économiques, environnementaux mais aussi techniques, afin d'évaluer le caractère durable du schéma. Cet article décrit la méthode développée et présente les résultats obtenus pour un cas d'étude localisé à Surabaya (Indonésie) tel que défini par TSC.

1. Matériel et méthodes

1.1 Approche méthodologique

La méthodologie présentée dans cette partie intègre trois étapes :

1. Estimation des gisements de déchets
2. Analyse économique du schéma d'économie circulaire
3. Analyse environnementale du schéma d'économie circulaire

1.2 Méthode d'estimation des gisements des déchets

L'estimation des gisements de déchets sur la base de la littérature scientifique disponible n'intègre que les fleuves relativement importants, une méthode complémentaire a donc été développée afin d'estimer les quantités potentiellement présentes dans les rivières. Cette méthode de quantification des émissions de déchets plastiques dans l'environnement se base sur des données de répartition géographique de la population, en y intégrant la prévision d'évolution démographique sur la durée du projet telle qu'estimée par les Nations Unies (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2019). Les données relatives au traitement des déchets, à leur caractérisation et aux modes de consommation des populations permettent également d'estimer la production de déchets plastiques ainsi que leurs origines (Kaza et al. 2018). Enfin, l'effet du ruissellement des eaux de pluie entraînant les déchets terrestres non-collectés de la terre vers la mer a été introduit afin d'estimer le plus précisément possible les gisements en fonction des tailles des bassins versants (Jambeck et al. 2015). Cette méthode permet ainsi d'estimer et de caractériser les gisements de déchets plastiques disponibles sur terre et dans les rivières.

1.3 Méthode d'analyse économique

Dans chaque territoire étudié, un schéma d'économie circulaire peut être défini et caractérisé par des flottes de bateaux et de camions de collecte, des infrastructures de tri et une unité de valorisation énergétique. Chaque élément constituant le système économique circulaire étant associé à deux caractéristiques propres : son coût d'investissement et ses coûts opérationnels. A cela, viennent s'ajouter les recettes engendrées par les opérations de valorisation.

L'investissement intègre le coût de développement, de construction et d'acheminement des équipements. Seuls les camions nécessitent un renouvellement sur la durée de vie du projet fixée à 20 ans, et donc un investissement supplémentaire au cours du projet. Les coûts opérationnels intègrent les dépenses périodiques nécessaires au fonctionnement des équipements (carburants, maintenance, salaires des opérateurs...). Enfin, les recettes sont générées par la vente des matières recyclables, en fonction du cours des matières premières et recyclées, et par la production d'énergie pour les déchets valorisés, en fonction du prix de l'électricité. De plus, des recettes issues de la vente d'un service de dépollution pourraient être envisagées auprès d'organismes publics ou privés (acteurs touristiques ou du milieu de la pêche...), comme c'est le cas pour la collecte et le traitement des ordures ménagères en France par exemple. Ces recettes sont des opportunités qui pourraient renforcer la viabilité du système mais elles n'ont pas été considérées dans le modèle présenté dans cet article.

L'ensemble de ces données permet de calculer le taux de rentabilité interne sur la durée de vie du projet. Ce taux doit être positif pour assurer la viabilité économique du schéma d'économie circulaire. Une carte heuristique des paramètres utilisés pour l'analyse économique a été construite (Figure 1).

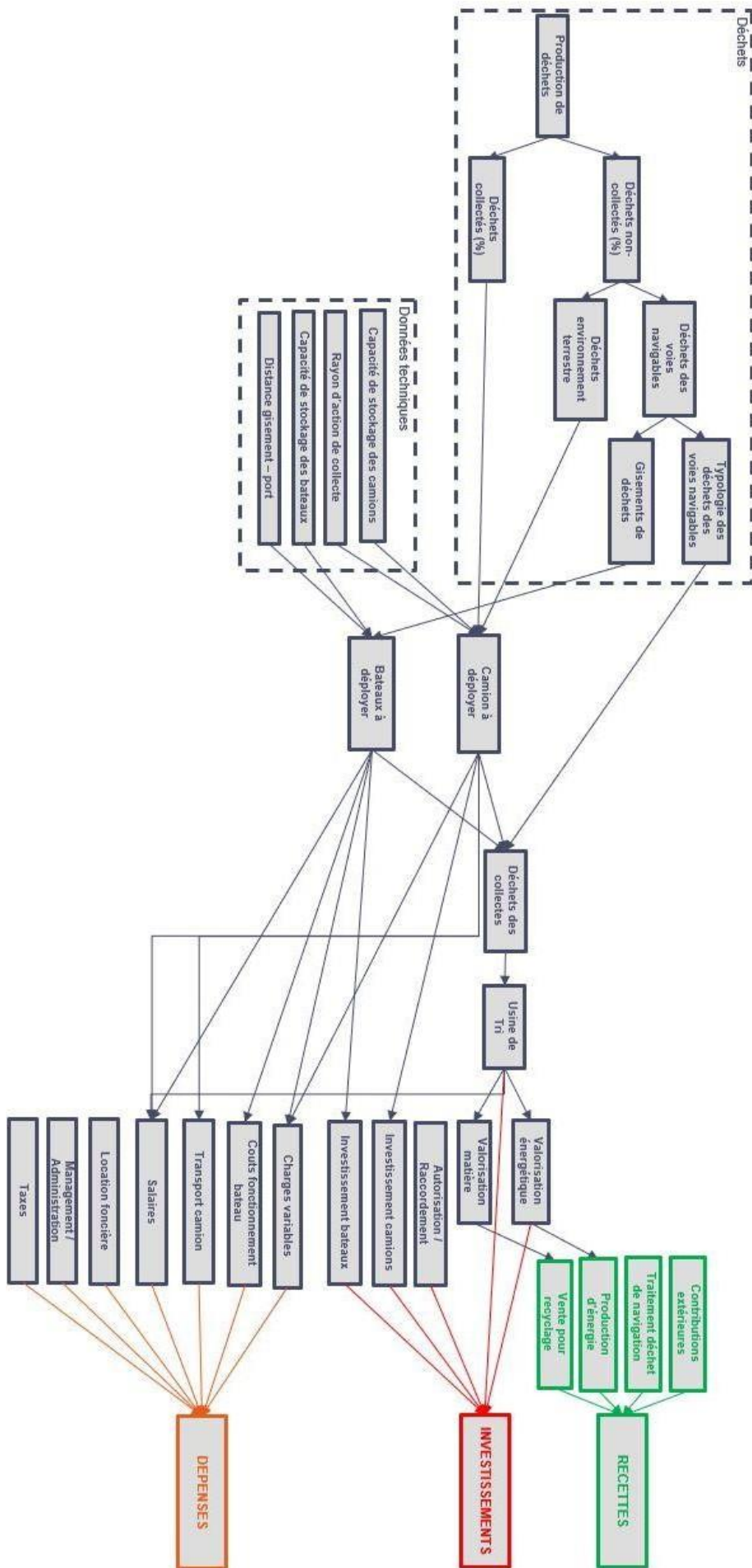


Figure 1 : Carte heuristique des paramètres d'entrée pour l'analyse économique

1.4 Méthode d'analyse environnementale

L'analyse environnementale du schéma d'économie circulaire repose sur la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) structurée par la suite des normes ISO 14040 et 14044. L'ACV consiste à évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un procédé ou d'un service tout au long de son cycle de vie, de l'extraction jusqu'à la fin de vie. Les quantités de matière et d'énergie consommées et rejetées sont d'abord comptabilisées à travers l'inventaire du cycle de vie (ICV), puis converties en impacts potentiels sur l'environnement (évaluation des impacts du cycle de vie (EICV)). Ces impacts potentiels sont généralement exprimés en fonction d'une substance de référence dont la pression et l'intensité de son action sur l'environnement est maîtrisée (kg CO₂ eq pour l'impact sur le changement climatique, par exemple) ou en une unité quantifiant la conséquence de cette pression sur l'écosystème (pourcentage d'espèces potentiellement affectées [PAF] pour l'écotoxicité aquatique, par exemple) (Kambou et al. 2018).

L'unité fonctionnelle choisie pour cette étude est la suivante : « L'implémentation et l'utilisation du schéma d'économie circulaire pour collecter et traiter les déchets dans la région de Surabaya pendant 20 ans ».

L'ACV a été réalisée à l'aide du logiciel SimaPro et des bases de données EcoInvent (v 3.01) et USLCI. La méthode de calcul choisie est ReCipe midpoint (2016).

1.5 Description du cas d'étude

Afin d'illustrer au mieux la construction de la méthode, un cas d'étude présentant le schéma d'économie circulaire a été sélectionné (Figure 2).

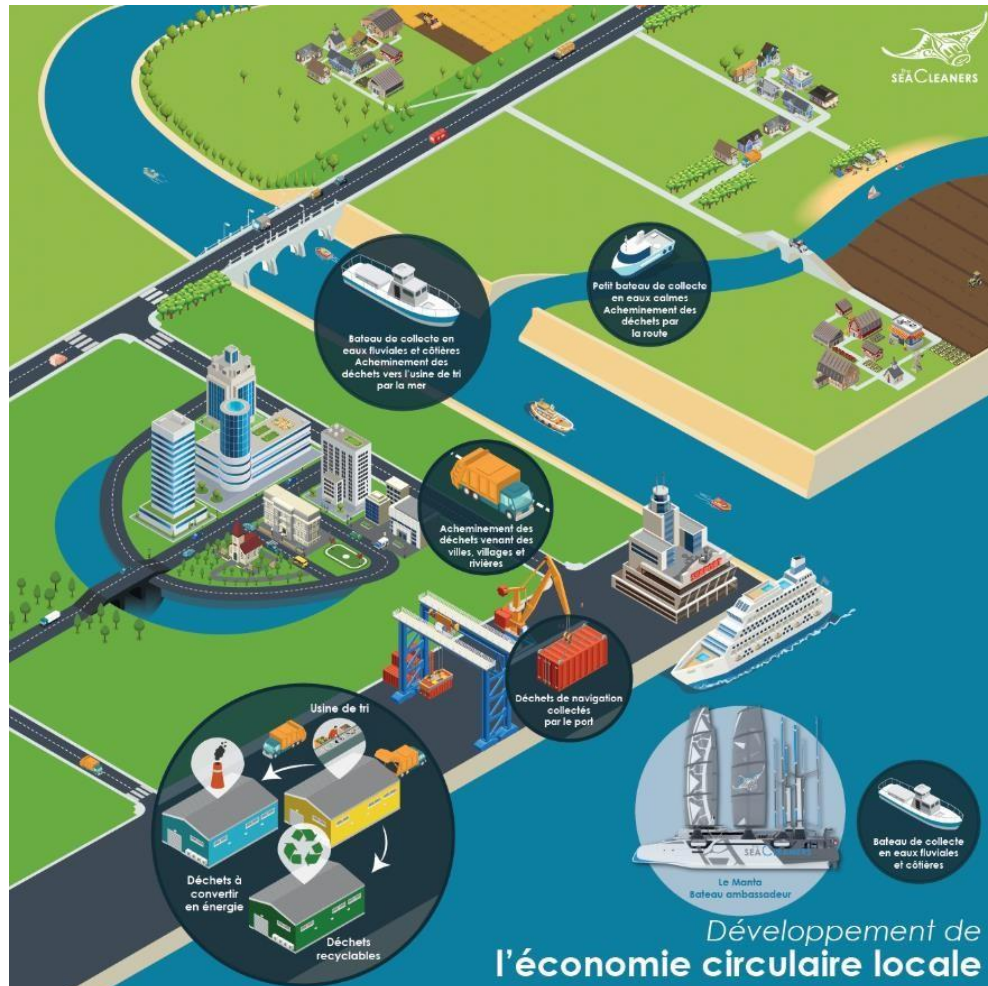


Figure 2 : Schéma représentant le fonctionnement du schéma d'économie circulaire en Indonésie

Ainsi, en raison d'une grande concentration (Tableau 1) de pollution plastique en Asie du Sud-Est et notamment en Indonésie, le cas d'étude choisi se situe à Surabaya (port de Tanjung Perak), sur l'île de Java (Firdaus, Trihadiningrum, et Lestari 2020). Les rivières alentours, et en particulier le fleuve du Brantas qui est le plus long de la province indonésienne de Java oriental, sont considérablement polluées et nécessitent une collecte des déchets qui engorgent ces zones aquatiques. La dépollution de ces sites est une des priorités du gouvernement indonésien (World Economic Forum 2020).

Tableau 1 : Estimation de la quantité de déchets dans les rivières de Surabaya (Java, Indonésie)

Estimation de la quantité de déchets dans les rivières de Surabaya			
Paramètre	Sous-paramètre	Valeur	Unité
Population	Population initiale (en 2021)	3 853 661	hab.
Ville	Superficie	326	km ²
Déchets	Production quotidienne de la ville	2 482	T/jour
	Production annuelle de la ville	905 903	T/an
	Proportion de déchets non collectés	37, 1	%
	Proportion de déchets non collectés se retrouvant dans l'environnement aquatique	30, 0	%

Divers équipements sont déployés pour collecter dans les rivières et sur terre : des bateaux de collecte permettent de récupérer les macro-déchets plastiques ainsi que les autres déchets (verre, métaux...) qui flottent dans les rivières et fleuves, et des camions permettent de collecter à terre les déchets urbains des villes et villages. L'ensemble de ces déchets est ensuite acheminé vers un centre de tri. Dans le cadre du scénario sélectionné, nous avons pris comme hypothèse de travail la répartition de la valorisation des déchets suivante : après avoir été triés, 40 % des déchets plastiques sont non recyclables et emmenés vers une usine de valorisation énergétique installée localement, à proximité du centre de tri et les 60 % de déchets plastiques restants sont vendus pour être recyclés dans les filières de recyclage locales existantes dans la ville de Surabaya. L'unité de valorisation est implantée au sein du port de Tanjung Perak de manière à transformer les déchets en électricité afin d'alimenter les usages du port (grues, éclairage, climatisation, ...). Les autres types de déchets, comme le verre ou les métaux qui sont également collectés et triés, sont vendus pour être recyclés localement sur l'île de Java.

Plus spécifiquement, pour alimenter notre méthode, nous avons développé un cas d'étude qui met en œuvre huit bateaux de collecte **déployés dans les cours d'eau** et douze camions qui vont être déployés dans les villes et villages aux alentours de Surabaya à des points d'apport volontaire **afin de récolter des déchets disponibles sur terre**. Il ressort de l'analyse que près de 6 000 tonnes de plastiques peuvent être collectées annuellement. Au vu des ordres de grandeur, les gisements collectés peuvent totalement s'intégrer à l'existant. En effet, l'analyse estime la collecte à 6 000 tonnes de plastique annuellement sur un volume de déchets produit de plus de 900 000 tonnes/an.

Le cas d'étude du projet de système économique circulaire considéré démarre en 2022 pour une durée d'exploitation de 20 ans, ce qui correspond à la durée de vie moyenne estimée des équipements.

2. Démarche et étapes de l'analyse

Dans cette section, la démarche méthodologique sera développée en considérant les paramètres synthétisés dans le Tableau 2. Ces paramètres seront les données d'entrée pour les analyses technico-économique et environnementale.

Tableau 2 : Paramètres servant de données d'entrée pour l'étude

Catégories	Paramètres	Valeur			Unité
		Unité de valorisation	Bateau	Camion	
Durée de vie des équipements		20	20	12	années
Production d'électricité	Capacité de production d'électricité	500			kWh
	Heures de tri	10			h/jour
	Heures de valorisation	24			h/jour
Caractéristiques des équipements de collecte	Dimensions		8(L)*2,3(l)		M
	Poids		2,6	3,5	T
	Vitesse moyenne		10,2	50	km/h
	Consommation de carburant		61.2	12	L/100km
Répartition par action/activité	Jours de collecte (déplacement compris)			312	j/an
	Heures de collecte (hors déplacement)		1794		h/an
Distance parcourue				24960	km/an
Capacité de collecte des équipements	Densité des déchets plastiques		50		kg/m ³
	Densité des autres déchets		70		kg/m ³
	Capacité totale		540	640	kg

2.1 Analyse technico-économique

L'investissement nécessaire pour l'implantation d'un tel schéma d'économie circulaire sur le territoire indonésien est de 8,8 Millions d'euros (dépenses d'acquisition, frais de transport, développement, taxes...). L'analyse économique permet d'estimer les flux financiers (« cash flows »), c'est-à-dire les dépenses et recettes qui sont amenées à varier en fonction du lieu d'implantation et des critères retenus. Ces flux financiers sont exprimés annuellement afin de tenir compte des évolutions des cours du marché et plus précisément de la valeur de la monnaie considérée.

Les dépenses ont été catégorisées afin d'identifier les postes de dépenses majoritaires. L'investissement pour l'acquisition et la mise en service des équipements de collecte et de valorisation des déchets représentent les dépenses les plus importantes à engager et leurs amortissements (annuels) sont considérés comme constants sur la durée totale d'exploitation des équipements. La répartition par poste de dépenses exclut ces amortissements et vise à rassembler uniquement les postes de dépense de fonctionnement (Tableau 3).

Tableau 3 : Répartition des postes de dépenses de fonctionnement (%)

Catégorie	Pourcentage
Salaires	73,7%
Coûts de fonctionnement	20,8%
Charges (taxes et assurances)	3,9%
Location foncière	1,5%

Les salaires représentent le poste de dépense majoritaire avec 73,7% des dépenses de fonctionnement (hors amortissements). Les coûts de fonctionnement des équipements de collecte et des unités de tri et de valorisation des déchets représentent environ un cinquième des dépenses annuelles. Cette catégorisation permet de mettre en exergue la part prépondérante des coûts salariaux nécessaires pour implanter un tel schéma.

Dans nos recherches, peu d'informations sur les taxes et charges relatives à ce type d'activités ont été trouvées, et ces postes de dépenses restent peut-être sous-estimés.

Les recettes potentielles générées par la valorisation des matières dépendent du cours des matières et de l'électricité, des partenariats établis pour le recyclage et des rendements obtenus pour la valorisation énergétique des plastiques. En considérant ces cours stables sur une période de 20 ans, on constate que le recyclage des

matières plastiques est plus intéressant économiquement que la valorisation énergétique. Dans les proportions de valorisation des déchets retenues (40% de valorisation en électricité / 60% de valorisation « matière »), 70,3% des recettes estimées proviennent du recyclage des plastiques alors que seuls 22,2% des recettes proviennent de la revente de l'électricité produite. Néanmoins, les besoins en électricité pouvant varier spatialement et temporellement, la valorisation énergétique des plastiques peut représenter une solution économiquement intéressante dans certains contextes, comme par exemple sur des sites insulaires disposant d'un réseau de distribution électrique isolé et générant leur électricité à l'aide de groupes électrogènes.

La Figure 3 présente l'évolution de la marge nette cumulée sur le temps du projet considéré. Les investissements des équipements sont ici considérés à l'année t0, avec un renouvellement des camions lors de la douzième année, les camions étant remplacés tous les 300 000 km.

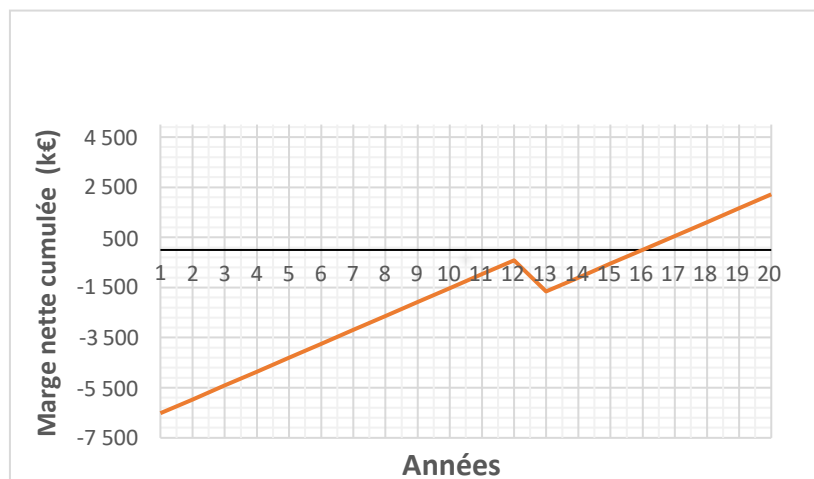


Figure 3 : Evolution de la marge nette cumulée (k€) sur le temps du projet

La marge nette cumulée devient positive à partir de la seizième année du projet et le taux de rentabilité interne (TRI) est estimé à 3,3% pour une période de vingt ans.

La part des salaires est relativement importante puisqu'elle occupe plus de deux tiers des postes de dépenses pour le déploiement d'un équipement de collecte. La part des coûts de maintenance des équipements (changement de pièces, salaires des mécaniciens...) reste relativement faible au regard de l'importance d'une maintenance adaptée et régulière, permettant d'assurer (et potentiellement de prolonger) la durée de vie des équipements.

Les recettes potentielles générées par ces équipements dépendent fortement de paramètres inhérents aux

déchets (quantités, typologies, stade de dégradation...) mais également des procédés de valorisation envisagés.

Cette analyse économique donne une tendance sur les flux financiers à engager pour le déploiement d'un tel schéma en Indonésie. Les investissements pour les équipements, considérés comme des actifs, représentent les principales dépenses au début du projet à hauteur d'environ huit millions d'euros. La durée de vie de ces équipements et du projet doit permettre d'atteindre sa soutenabilité en fonction des cours des marchés et des modèles de calcul des recettes et dépenses définis.

2.2 Analyse environnementale

Le périmètre de l'étude (Figure 4) comprend les phases de production, d'utilisation, de maintenance et de fin de vie des différents équipements (unité de valorisation énergétique des déchets, bateaux de collecte et camions). Le transport engendré lors des différentes étapes est également pris en compte. En ce qui concerne les déchets récoltés, l'impact de leur recyclage ou de leur valorisation est évalué. Les procédés de recyclage spécifiques à l'Indonésie n'étant pas disponibles dans la base de données, ce sont les procédés de l'échelle mondiale qui ont été utilisés. Ces derniers ont été légèrement modifiés en remplaçant l'électricité en entrée par le mix électrique indonésien. Les principales hypothèses de l'étude sont listées dans le Tableau 2 présenté précédemment.

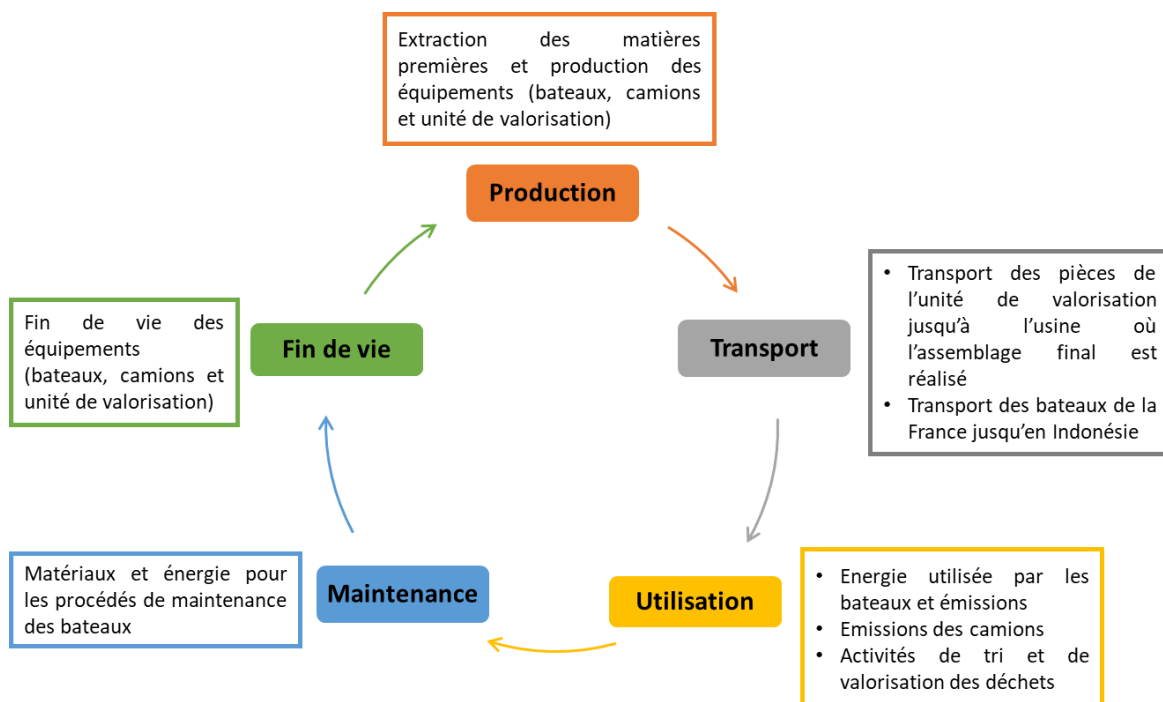


Figure 4 : Périmètre de l'étude pour l'Analyse du Cycle de Vie

La Figure 5 illustre les impacts environnementaux des différents équipements du schéma d'économie circulaire pour le cas d'étude choisi. Le Tableau 4 présente en détail les résultats de l'ACV pour les différents traitements des déchets.

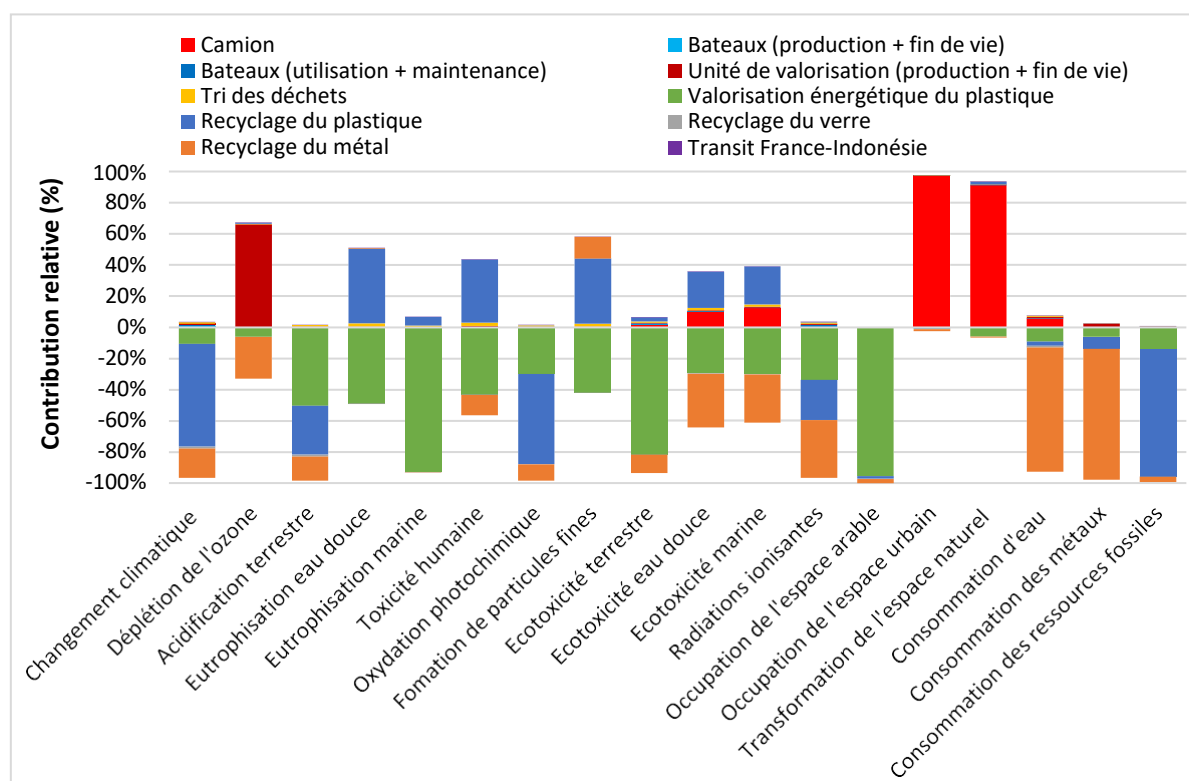


Figure 5 : Résultats de l'analyse de cycle de vie du schéma d'économie circulaire sur 20 ans

Tableau 4 : Impacts environnementaux des différents traitements des déchets

Catégorie d'impact	Unité	Valorisation plastique	Recyclage plastique	Recyclage verre	Recyclage métaux
Changement climatique	kg CO2 eq	-2,77E+07	-1,72E+08	-2,79E+06	-4,93E+07
Déplétion de l'ozone	kg CFC-11 eq	-4,27E+00	3,86E-01	1,78E-01	-1,87E+01
Acidification terrestre	kg SO2 eq	-6,76E+05	-4,19E+05	-1,51E+04	-2,09E+05
Eutrophisation eau douce	kg P eq	-7,65E+04	7,53E+04	-4,80E+02	3,88E+02
Eutrophisation marine	kg N eq	-1,34E+05	8,14E+03	-2,06E+02	-4,83E+02
Toxicité humaine	kg 1,4-DB eq	-4,65E+07	4,41E+07	-5,32E+05	-1,40E+07
Oxydation photochimique	kg NMVOC	-3,98E+05	-7,71E+05	4,34E+03	-1,40E+05
Formation de particules fines	kg PM10 eq	-1,18E+06	1,18E+06	-3,01E+03	3,94E+05
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB eq	-1,31E+04	4,23E+02	-2,07E+01	-1,91E+03
Ecotoxicité eau douce	kg 1,4-DB eq	-1,15E+06	9,18E+05	-1,09E+04	-1,36E+06
Ecotoxicité marine	kg 1,4-DB eq	-1,16E+06	9,33E+05	-5,44E+03	-1,19E+06
Radiations ionisantes	kBq U235 eq	-3,05E+06	-2,33E+06	6,63E+04	-3,36E+06
Occupation de l'espace arable	m2a	-6,08E+07	-1,10E+06	-1,47E+05	-1,67E+06
Occupation de l'espace urbain	m2a	-4,91E+05	-2,55E+05	7,67E+04	-6,51E+05
Transformation de l'espace naturel	m2	-2,26E+04	6,27E+03	1,33E+02	-2,36E+03
Consommation d'eau	m3	-4,74E+07	-1,47E+07	-4,95E+06	-4,16E+08
Consommation des métaux	kg Fe eq	-1,91E+06	-2,35E+06	-5,07E+03	-2,62E+07
Consommation des ressources fossiles	kg oil eq	-2,89E+07	-1,68E+08	-1,80E+05	-7,04E+06

L'impact environnemental de chaque élément est présenté en fonction de sa contribution relative. Les scores à valeurs positives représentent des impacts négatifs causés sur l'environnement alors que les scores à valeurs négatives indiquent des impacts évités ou des bénéfices environnementaux.

Les phases de production et de fin de vie des bateaux de collecte ainsi que leur transport entre la zone de construction et la zone d'opération ont des impacts négligeables, de même pour les activités de tri des déchets (moins de 1%). Les bateaux sont construits majoritairement en aluminium qui est un matériau qui se recycle très bien. Par conséquent, la recyclabilité de l'aluminium permet de diminuer les impacts négatifs générés par la production très énergivore de ce matériau, et ceci explique la faible contribution de la phase de production des bateaux.

Sur l'ensemble du cycle de vie, le schéma d'économie circulaire permet d'éviter des impacts sur l'environnement grâce à la valorisation des déchets. En effet, les impacts évités par cette valorisation sont plus importants que les impacts négatifs occasionnés par la production et l'utilisation des différents équipements. Seules trois catégories d'impacts présentent des scores à valeur globale positive, associés à des impacts négatifs provenant principalement de la production des équipements et des camions. Plus précisément, c'est la production de Téflon, nécessaire afin de faciliter la manutention, qui est responsable de l'impact négatif de l'unité de valorisation sur Déplétion de l'ozone (66%). Les camions ont un impact majeur sur les catégories Transformation de l'espace naturel (91%) et Occupation de l'espace urbain (98%) lorsque l'on prend en compte la construction des infrastructures routières nécessaire à leur utilisation.

Les différents traitements des déchets génèrent des bénéfices environnementaux : la valorisation permet d'éviter des impacts dans toutes les catégories alors que le recyclage engendre des bénéfices dans certaines catégories seulement (16 pour les métaux, 9 pour les plastiques, 13 pour le verre). En faisant la moyenne des contributions pour les catégories dans lesquelles l'impact des traitements a une **moyenne valeur** négative, la valorisation énergétique des plastiques affiche le bénéfice le plus important (- 35% en moyenne sur l'ensemble des catégories), suivi du recyclage des métaux (- 20% en moyenne sur 16 catégories) et du recyclage des plastiques (- 5% en moyenne sur 9 catégories). Le bénéfice environnemental du verre est négligeable par rapport à ceux des métaux et des plastiques (moins de - 1% en moyenne sur 13 catégories).

Les impacts occasionnés par le recyclage proviennent principalement de l'électricité utilisée lors du processus. En effet, selon la base de données Ecoinvent, la production d'électricité en Indonésie provient d'un mix de gaz

naturel, de géothermie, de pétrole, d'hydroélectricité et de lignite. En ce qui concerne le recyclage des plastiques, la majorité des impacts **sont produits est produite** par le recyclage du Polyéthylène car ce dernier est présent en **majorité quantité importante** dans les déchets récoltés (67% du plastique récolté).

Finalement, le recyclage et la valorisation des déchets permettent de diminuer l'impact global du schéma d'économie circulaire. En effet, les impacts négatifs occasionnés par la production et l'utilisation des différents équipements sont moins importants que les bénéfices environnementaux générés par le traitement des déchets récoltés. En ce qui concerne les déchets plastiques, malgré le fait qu'une majorité soit recyclée (60%), c'est leur valorisation énergétique qui permet d'éviter le plus d'impacts. En effet, d'une part cette dernière génère des bénéfices environnementaux dans l'ensemble des catégories contre seulement la moitié pour le recyclage et d'autre part les bénéfices sont plus importants (- 35% en moyenne sur toutes les catégories pour la valorisation contre - 5% en moyenne sur 9 catégories pour le recyclage).

Discussion

En plus des résultats économiques et de l'ACV, la méthode outillée permet d'estimer le pourcentage de dépollution des cours d'eau au bout de 20 ans. Avec les données et les équipements actuels, ce dernier se situe autour de 10% quels que soient les paramètres d'entrée si on recherche uniquement une viabilité économique du système. Les données devront être affinées au fur et à mesure de l'avancée du processus de conception du système. Pour améliorer ces performances, TSC a d'ores et déjà lancé le développement d'autres moyens de collecte (bateaux et systèmes de collecte aquatique) pour augmenter la capacité de collecte et l'accessibilité à des zones actuellement non dépolluables. De plus, bien que cet article démontre l'intérêt de déployer de telles solutions de collecte en milieu aquatique, intensifier la collecte des ordures ménagères dans les villes et villages en développant les flottes de camions, et augmenter la capacité de traitement de l'unité de valorisation énergétique, seraient très bénéfiques, surtout si des actions de sensibilisation sont menées en parallèle auprès des populations afin de réduire la quantité de déchets produite.

Il ressort de cette étude que la valorisation énergétique des déchets plastiques apporte plus de bénéfices que le recyclage d'un point de vue environnemental. Cependant, certains éléments de l'unité de valorisation énergétique ont un impact environnemental négatif important comme l'utilisation de Téflon dans l'unité la phase de préparation des intrants au sein de l'unité de valorisation pour faciliter la manutention de ces intrants. C'est une piste d'amélioration de l'impact environnemental du système qui a été identifiée et rapportée aux concepteurs afin de les aider dans leurs réflexions.

Des analyses de sensibilité ont également été réalisées sur divers paramètres afin d'étudier les incertitudes liées aux divers résultats. Ces analyses concernent principalement la densité massique des déchets dans les sacs de collecte, le prix de revente du plastique pour le recyclage, et la capacité de collecte des bateaux. Suite aux analyses des différentes variations, les conclusions à propos de la viabilité économique et du bénéfice environnemental n'ont pas été remises en cause. Seuls des changements jugés irréalistes (division par deux de la densité des déchets dans les sacs de collecte par exemple) ont rendu le schéma étudié non économiquement viable, quelle que soit la flotte déployée.

Conclusion

Cette étude a permis de démontrer l'intérêt économique et environnemental de la mise en place d'un schéma d'économie circulaire local intégrant une collecte aquatique et terrestre et une valorisation énergétique et « matière » des déchets (principalement) plastiques. La pollution plastique des rivières et des océans prend de plus en plus d'ampleur et des solutions telles que celle présentée dans cet article peuvent permettre d'endiguer ce phénomène. Il est aussi important de vérifier le bénéfice environnemental net d'une telle solution afin que le système n'engendre pas plus de pollution par son déploiement et son exploitation qu'il n'en évite. Enfin, l'étude de la viabilité économique permet de définir un cadre opérationnel dans lequel le système est économiquement viable. Cela apporte des garanties quant à la pérennité de telles solutions dont l'exploitation n'est pas tributaire d'aides financières extérieures. Ainsi, toute aide financière contribuera à augmenter, soit la viabilité du schéma d'économie circulaire (ce qui permettrait son déploiement par des acteurs privés), soit le montant des investissements possibles (ce qui permettrait d'augmenter la capacité de collecte et de valorisation des déchets du schéma d'économie circulaire local).

Cette étude ouvre la voie au déploiement de solutions de dépollution des océans dans les zones du globe les plus touchées. L'outil développé autour de la méthodologie présentée pourra facilement être répliqué sur d'autres zones en adaptant le schéma afin d'intégrer les spécificités locales (coûts de l'énergie, coûts salariaux, gisements de déchets, ...).

Par ailleurs, certains axes d'amélioration identifiés lors de l'étude présentent une marge de progression intéressante quant à l'intérêt économique et environnemental du schéma d'économie circulaire. A cela, s'ajoute également l'impact social qui se traduit localement par la création ou la pérennisation d'emplois et l'amélioration des conditions de vie (dépollution des eaux, production d'énergie, pérennisation des ressources halieutiques et des activités touristiques...).

Enfin, la mise en place d'un tel schéma pourra générer des opportunités intéressantes pour la sensibilisation des communautés locales (collectivités locales, acteurs industriels et citoyens) à la pollution plastique et à la mise en œuvre de plans d'actions pour réduire la consommation de plastique (upcycling, réemploi, ...). Ces actions complémentaires permettront de renforcer les systèmes économiques circulaires et de limiter ou mettre fin aux solutions dites « end-of-pipe ».

Remerciements

Les auteurs remercient Capgemini Engineering et The SeaCleaners qui ont rendu possible cette étude par le financement et mise à disposition des données nécessaires à sa réalisation.

Références bibliographiques

S. Borrelle, B., J. Ringma, K. Lavender Law, C. Monnahan, L. Lebreton, A. McGivern, E. Murphy, J. Jambeck, G. H. Leonard, M. A. Hilleary, M. Eriksen, H. Possingham, H. De Frond, L. Gerber, B. Polidoro, A. Tahir (2020). « Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution ». *Science* 369, **6510**, 1515-1518.

<https://doi.org/10.1126/science.aba3656>

M. Firdaus, Y. Trihadiningrum, et P. Lestari (2020). « Microplastic pollution in the sediment of Jagir estuary, Surabaya City, Indonesia ». *Marine pollution bulletin*, **150**, 110790.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110790>

J. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, et K. Lavender Law (2015). « Plastic waste inputs from land into the ocean ». *Science* 347 (**6223**), 768-771.

<https://doi.org/10.1126/science.1260352>

F. Kambou, N. Gondran, A. Wolff, et Y. Perrodin (2018). « Vers une évaluation absolue de la durabilité écologique: quelle variabilité des valeurs de référence associées à l'écotoxicité aquatique? » *Déchets Sciences et Techniques*, **77**. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3792>

S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, et F. Van Woerden (2018). « What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050 ». *World Bank Publications*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

E. MacArthur (2017). « Beyond Plastic Waste ». *Science* 358, **6365**, 843-843, <https://doi.org/10.1126/science.aao6749>.

L. Persson, B. M. Carney Almroth, C. D. Collins, S. Cornell, C. A. de Wit, M. L. Diamond, P. Fantke, M. Hassellöv, M. MacLeod, M. W. Ryberg, P. Sogaard Jørgensen, P. Villarrubia-Gómez, Z. Wang, and M. Zwicky Hauschild « Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities » *Environmental Science & Technology* 2022 56 (3), 1510-1521 <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). « World Population Prospects 2019: Methodology of the United Nations Population Estimates and Projections », **61**.

https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/files/documents/2020/Jan/un_2019_wpp_methodology.pdf

World Economic Forum (2020). « Radically Reducing Plastic Pollution in Indonesia: A Multistakeholder Action Plan National Plastic Action Partnership ». <https://globalplasticaction.org/wp-content/uploads/NPAP-Indonesia-Multistakeholder-Action-Plan-April-2020.pdf>.