

Construction d'un cadre de référence pour la valorisation matière, chimique ou thermique de macro-plastiques sauvages en contexte ultramarin

N/REF. : PA 20-104 / BE2104929

Octobre 2021

CITEO



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES	5
TABLE DES TABLEAUX	6
GLOSSAIRE	8
Présentation des enjeux de l'étude	9
Phase 1 : Description de la problématique et caractérisation du gisement	10
1. Contexte général	10
1.1. Origine des plastiques et facteurs influents.....	10
1.2. Effets de la pollution plastique en mer	14
2. Contexte spécifique des espaces maritimes français.....	15
2.1. Territoires	15
2.2. Gestion des déchets dans les DROM-COM	16
3. Caractérisation du gisement	18
3.1. Identification du gisement	18
3.2. Qualification du gisement	21
4. Conclusions de la phase 1.....	26
Phase 2 : Description des solutions techniques et définition des filières	28
5. La collecte.....	28
1.1. Collecte « mobile »	28
1.2. Collecte statique.....	38
1.3. Fiches techniques – comparaison technico-économique et environnementale	42
2. Le tri et le nettoyage	45
2.1. Nettoyage	45
2.2. Tri manuel.....	46
2.3. Tri optique	47
2.4. Tri par flottaison ou tri hydraulique	48
2.5. Tri pneumatique	49
2.6. Tri par triboélectricité.....	50
2.7. Tri chimique.....	51
2.8. Fiches technique – comparaison technico-économique et environnementale.....	52
3. Broyage et nettoyage	53
3.1. Criblage.....	53

3.2.	Nettoyage	53
3.3.	Séchage.....	54
3.4.	Fiches techniques – comparaison technico-économique et environnementale	56
4.	Le recyclage mécanique	57
4.1.	Extrusion.....	57
4.2.	Injection / moulage	59
4.3.	Fiches technique – comparaison technico-économique et environnementale.....	61
5.	Le recyclage chimique et la valorisation énergétique	61
5.1.	Dépolymérisation thermique	62
5.2.	Dissolution sélective	62
5.3.	Dépolymérisation chimique ou solvolysé.....	64
5.4.	Pyrolyse	65
5.5.	Liquéfaction hydrothermale.....	69
5.6.	Gazéification.....	71
5.7.	Fiches technique – comparaison technico-économique et environnementale.....	75
6.	Conclusions de la phase 2.....	78
6.1.	Collecte et tri	81
6.2.	Recyclage mécanique	81
6.3.	Valorisation énergétique.....	82
Phase 3 - Etude technico-économique et environnementale de filières de traitement		84
1.	Scénario 1 – valorisation et traitement des déchets à petit échelle.....	84
6.4.	Présentation du scénario 1.....	84
6.5.	Dimensionnement technique et économique	87
6.6.	Analyse économique	91
7.	Scénario 2 – valorisation et traitement des déchets mutualisés au déchets terrestres.	98
7.1.	Présentation du scénario 2.....	98
7.2.	Dimensionnement technique.....	100
7.3.	Analyse économique	102
Conclusion générale		108
1.	Quelles sont les principales sources de pollutions des milieux aquatiques et marins aux plastiques ?.....	108
2.	Comment est impacté le cycle de vie des plastiques en milieu aquatique et marin ? ...	109
3.	Quels sont les principaux impacts des pollutions plastiques sur les écosystèmes marins ?	110
4.	Quelles sont filières de traitements pour les plastiques aquatiques et marins ?	111

4.1.	Collecte et qualification du gisement.....	111
4.2.	Recyclage mécanique	111
4.3.	Valorisation énergétique.....	112
5.	En résumé, qu'est-ce qu'il faut faire ?.....	113
6.	Focus sur les initiatives en DROM-COM.....	114
Annexes.....		116
1.	Experts et ressources	116
1.1.	Personnes interviewées	116
1.2.	Autres personnes ressources (non consultées).....	117
2.	Liste de références	118
2.1.	Publications	118
2.2.	Rapport et autres communications.....	119

TABLE DES FIGURES

Figure 1: chaîne de valeur pour la valorisation et le traitement des plastiques.....	9
Figure 2 : Description des différents phénomènes intervenants pendant le transport fluvial des déchets (ADEME 2020).....	11
Figure 3 : probabilité d'émission d'un déchet dans le milieu marin (Meijer et al. 2021)	12
Figure 4 : principales sources de contamination (Meijer et al 2021).....	12
Figure 5 : transports des plastiques dans les océans (ADEME 2020).....	13
Figure 6 : photos de plongée lors de l'étude de l'accumulation de l'île de Roatan (source : CLS).....	14
Figure 7 : Plage du Prado à Marseille après les inondations de 2021 (© AFP / Nicolas Tucot)	14
Figure 8 : Espaces maritimes sous juridiction française et concernés par l'étude.....	16
Figure 9 : Unité d'incinération à la Martinique (gauche) et à Saint Barthélémy (droite)	17
Figure 10 : Emissions plastiques estimés par l'analyse du territoire - exemple de la Baie de Fort de France (Martinique).....	18
Figure 11 : Estimation des émissions plastiques à partir des territoires français.....	19
Figure 12 : Exemple de résultats de caractérisation des déchets sauvages marins	21
Figure 13 : plastiques issus de l'activité conchylicole.....	22
Figure 14 : Caractérisation des plastiques mis sur le marché	24
Figure 15 : Répartition des résines plastiques à la production	24
Figure 16 : Chalut développé par Thomsea.....	32
Figure 17 : Robots développés par Geneseas/Recylamer (haut gauche), Jellyfish boat de lady (haut droite) et SeaVax (bas).....	34
Figure 18 : Navires de collecte et valorisation / traitement ; Manta de the Seacleaners (gauche) et Plastic Odyssey (droite).....	36
Figure 19 : Collecte par barrages flottants ; SEADS (haut gauche), Probul (haut droite), Ocean CleanUp (milieu gauche), Plastic Vortex (milieu droite) et M. Trash Wheel (bas).....	39
Figure 20 : Poubelle immergée Seabin.....	41
Figure 21 : Principe de l'extrusion.....	58
Figure 22 : Principe de l'injection	60
Figure 23 : Domaine sub et supercritique du CO ₂	64
Figure 24 : procédé de pyrolyse	66
Figure 25 : Classification des technologies de gazéification en fonction de la puissance de la capacité	72
Figure 26 : procédé de gazéification	73
Figure 27 : Schéma de principe pour la construction des filières de valorisation des macrodéchets flottants	80
Figure 28 : description générale du scénario 1	87
Figure 29 : Mise en œuvre du chalut T2 de CtoSea.....	88
Figure 30: description générale du scénario 2	101

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bilan de la quantité de déchets sauvages produits par territoire	18
Tableau 2: Répartition des OMA (OM résiduelles + collectes sélectives) selon le MODECOM 2017 ...	23
Tableau 3 : Caractéristiques techniques de la collecte manuelle	30
Tableau 4 : Type d'intervention de collecte suivant le stress environnemental de la zone	31
Tableau 5 : Caractéristiques techniques des filets collecteurs ou chaluts.....	33
Tableau 6 : Caractéristiques techniques des robots collecteurs.....	35
Tableau 7 : Caractéristiques techniques de la collecte par navires	38
Tableau 8 : Caractéristiques technique des barrages flottants.....	40
Tableau 9 : Caractéristiques techniques des poubelles immergées	41
Tableau 10 : Légende pour la lecture des tableaux de comparaisons des technologies	45
Tableau 11 : Caractéristiques techniques du nettoyage	46
Tableau 12 : Caractéristiques techniques du tri manuel.....	47
Tableau 13 : Caractéristiques techniques du tri optique	48
Tableau 14 : Caractéristiques techniques du tri par flottation	49
Tableau 15 : Caractéristiques techniques du tri pneumatique	50
Tableau 16 : Caractéristiques techniques du tri par triboélectricité.....	51
Tableau 17 : Caractéristiques techniques de l'extrusion	59
Tableau 18 : Caractéristiques techniques de l'injection moulage.....	60
Tableau 19 : Caractéristiques techniques de la dépolymérisation thermique	62
Tableau 20 : Caractéristiques techniques de la dissolution sélective	63
Tableau 21 : Caractéristiques techniques de la dépolymérisation chimique ou solvolysé.....	65
Tableau 22 : Caractéristiques techniques de la pyrolyse	68
Tableau 23 : Caractéristiques techniques de la liquéfaction hydrothermale	71
Tableau 24 : Caractéristiques techniques de la gazéification	74
Tableau 25 : Légende pour la Figure 27	79
Tableau 26 : Quantification des flux de déchets par résine et par voie de valorisation – scénario 1...	86
Tableau 27 : Description quantitative des flux recyclage mécanique et flux valorisation énergétique – scénario 1	85
Tableau 28 : Hypothèses économiques utilisées	92
Tableau 29 : Détail des CAPEX - scénario 1	93
Tableau 30 : Détail des produits - scénario 1	93
Tableau 31 : Détail des OPEX - scénario 1	94
Tableau 32 : Coûts de traitement pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique	95
Tableau 33 : Coûts de production pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique :	96
Tableau 34 : Coûts de traitement dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement	97
Tableau 35 : Coût de production du diesel dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement	97
Tableau 36 : Quantification des flux de déchets par résine et par voie de valorisation – scénario 2...	99
Tableau 37 : Quantification des flux de déchets terrestre par résine pour la mutualisation – scénario 2	100

Tableau 38 : Description quantitative des flux recyclage mécanique et flux valorisation énergétique – scénario 2	100
Tableau 39 : Détail des CAPEX - scénario 2	103
Tableau 40 : Détail des produits - scénario 2	103
Tableau 41 : Détail des OPEX - scénario 2	104
Tableau 42 : Coûts de traitement pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique	105
Tableau 43 : Coûts de production pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique :	106
Tableau 44 : Coûts de traitement dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement	107
Tableau 45 : Coût de production du diesel dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement	107

GLOSSAIRE

DEB	Direction de l'Eau et de la Biodiversité
DROM-COM	Département et Régions d'Outre-Mer et Collectivités d'Outre-Mer
ADEME	Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie
CEFREM	Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens
LEMAR	Laboratoire des Sciences de l'environnement marin
WWF	World Wide Fund for Nature
MIO	Institut Méditerranéen d'Océanologie
UIOM	Unités d'incinération des ordures ménagères
ISDND	Installation de Stockage de Déchets Non-Dangereux
CET	Centre d'Enfouissement Technique
UVE	Unité de Valorisation Energétique
CSR	Combustible Solide de Récupération
PA	Polyamide
GDR	Groupe de Recherche
PE	Polyéthylène
PP	Polypropylène
PS	Polystyrène
PET	Polyéthylène téréphtalate
PVC	Polychlorure de vinyle
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
PSE	Polystyrène expansé
MODECOM	Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères
OM	Ordures Ménagères
PEMRG	Plastics Europe Market Research Group
DAE	Déchets d'Activité Economiques
Tpa	Tonnes par an
UV	Ultraviolet
IR	Infra rouge
RX	Rayons X
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styène
PC	Polycarbonate
DEEE	Déchets d'Équipement Électrique et Électronique
TRL	Technology Readiness Level
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
VLE	Valeurs Limite d'Émissions
Wt%	% en poids
ACV	Analyse de Cycle de Vie

Présentation des enjeux de l'étude

La direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) du ministère de la transition écologique mène une politique de réduction des déchets marins, notamment des matières plastiques. Dans ce cadre, elle est régulièrement sollicitée pour financer des projets de collecte et de valorisation de déchets plastiques. En parallèle, CITEO, l'éco-organisme agréé en charge de la fin de vie des emballages ménagers et des papiers graphiques, accompagne constamment l'émergence de nouvelles solutions de recyclage et de valorisation des emballages ménagers, notamment en matières plastiques. Les deux structures souhaitent donc construire un cadre de référence permettant d'identifier les technologies pertinentes, ainsi que leurs conditions de mise en œuvre pour des petites unités de traitement (1 000 à quelques milliers de tonnes), en portant une attention particulière sur les DROM-COM.

Dans ce contexte, la présente étude a pour objectif :

- De comprendre les enjeux autour des déchets plastiques « sauvages » dans l'hexagone et pour chaque territoire des DROM-COM
- D'identifier les diverses technologies de recyclage et de valorisation opérationnelles ou en cours de développement adaptés aux zones isolées (territoires insulaires ou reculés)
- De caractériser les technologies pour préciser quels sont les déchets valorisables, quelles sont les étapes de pré et post-traitement ainsi que les implications sur les étapes de collecte.
- D'évaluer les technologies sur les aspects techniques, économiques et environnementaux.

Ainsi la chaîne de valeur considérée est la suivante (Figure 1) :

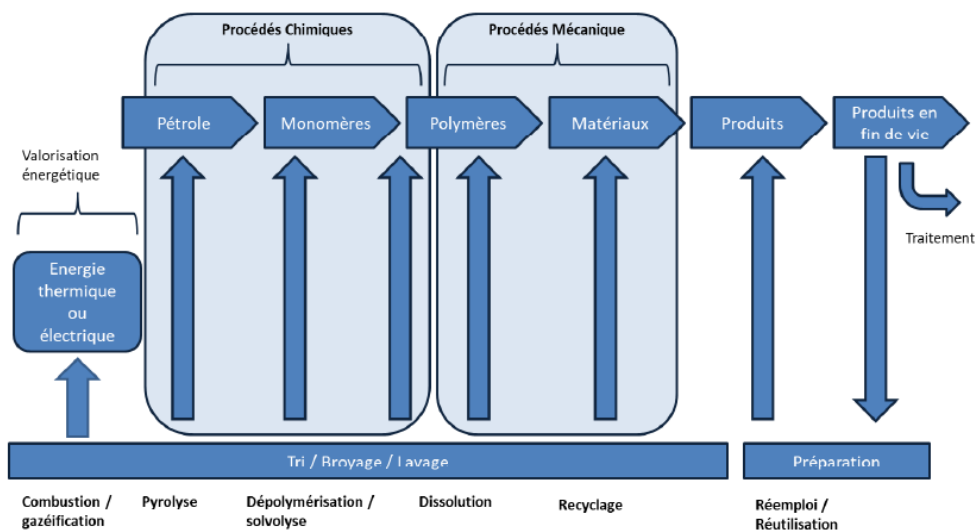


Figure 1: chaîne de valeur pour la valorisation et le traitement des plastiques

L'étude est déclinée en trois phases :

- **Phase 1** : description de la problématique et caractérisation du gisement
- **Phase 2** : identification des technologies d'intérêt
- **Phase 3** : évaluation des filières sur les plans technique, économique et environnemental.

Phase 1 : Description de la problématique et caractérisation du gisement

1. Contexte général

1.1. Origine des plastiques et facteurs influents

L'ADEME a publié un état des lieux de la pollution plastique en milieu marin en mars 2020¹. Cette étude décrit les phénomènes de pollution des milieux marins par des matières plastiques. On en retient les principaux enseignements suivants :

- Le gisement plastique en milieu marin est extrêmement diversifié. Toutes les résines peuvent être collectées ainsi que tous les adjuvants. De plus, le niveau de dégradation des plastiques va dépendre du temps de séjour et du milieu dans lequel ils ont séjourné. Les matières ont donc des propriétés et des comportements très différents. Aucune tendance n'a clairement été identifiée à ce jour.
- La quantité de plastique présente dans le milieu marin est importante. Elle est en croissance exponentielle. Il n'y a pas encore de consensus scientifique permettant d'estimer cette quantité.
- Les déchets plastiques en mer sont issus des activités industrielles, marines, de la mauvaise gestion des déchets terrestres, d'événements climatiques catastrophiques, de pertes ou d'incivilités.
- Une forte proportion de déchets plastiques marins est amenée du milieu terrestre par les cours d'eau.

Les différents phénomènes intervenants pendant le transport fluvial des déchets sont décrits dans la figure ci-dessous (Figure 2) :

¹ ADEME, Marek C., Parisot F. ; ECOGEOS, Guyomard M., Marcoux M., Rondel M. ; LEESU, Tramoy R. 2020. Lutte contre la pollution par les déchets plastiques en milieu marin. Rapport final. 119 pages

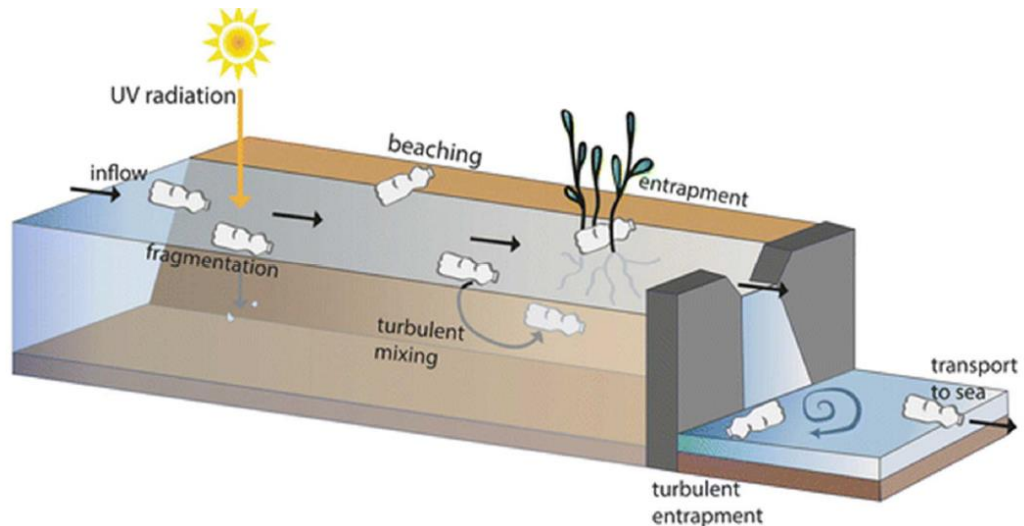


Figure 2 : Description des différents phénomènes intervenants pendant le transport fluvial des déchets ²(ADEME 2020)

Les récents travaux de publiés par Meijer et al. (2021)³ complètent ceux de Lebreton et al. (2017)⁴. Lebreton et al. a étudié les bassins versant et a identifié les 122 fleuves potentiellement responsables de la majorité de la pollution plastique des milieux marins. L'étude de Meijer et al. a permis d'ajouté un facteur de probabilité. Pour arriver dans le milieu marin, un déchet sauvage doit être mobilisé, transporté à la rivière puis transporté de la rivière au milieu marin (Figure 3).

²Kooi et al., 2017

³ Lourens J. J. Meijer, Tim van Emmerik, Ruud van der Ent, Christian Schmidt, Laurent Lebreton; 2021. More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean, Sci. Adv.

⁴ Lebreton L., van der Zwet J., Damsteeg J.-W., Slat B., Andrady A., Reisser J., 2017. River plastic emissions to the world's oceans, Nature communications 8:15611.

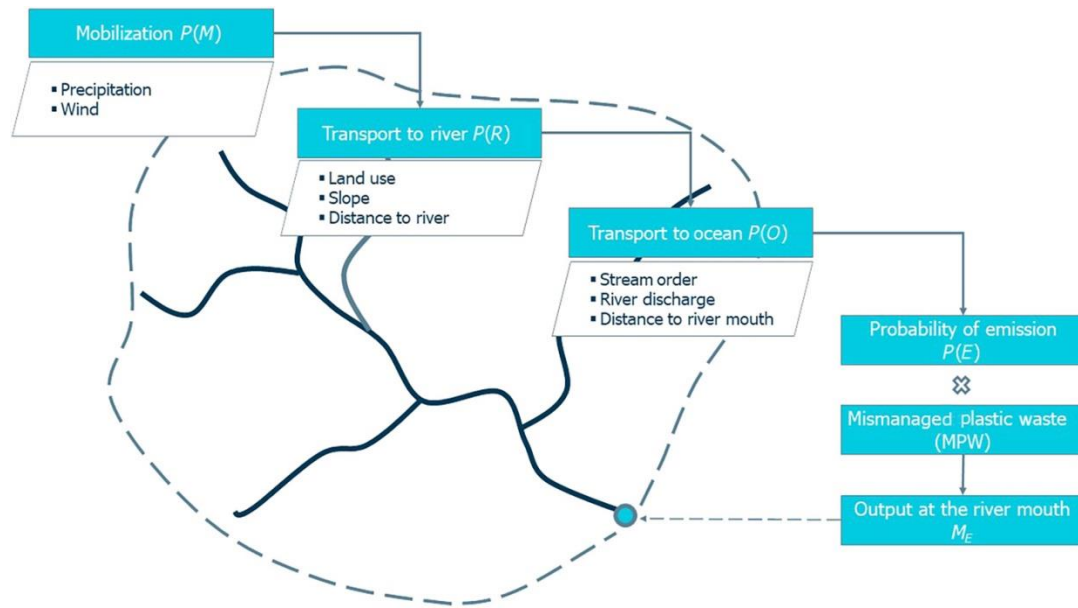


Figure 3 : probabilité d'émission d'un déchet dans le milieu marin (Meijer et al. 2021)

En tenant compte de ce facteur de probabilité, Meijer et al. A montré que 1800 rivières urbaines étaient émettrices de 80 % de la pollution plastique en milieu marin (Figure 4).

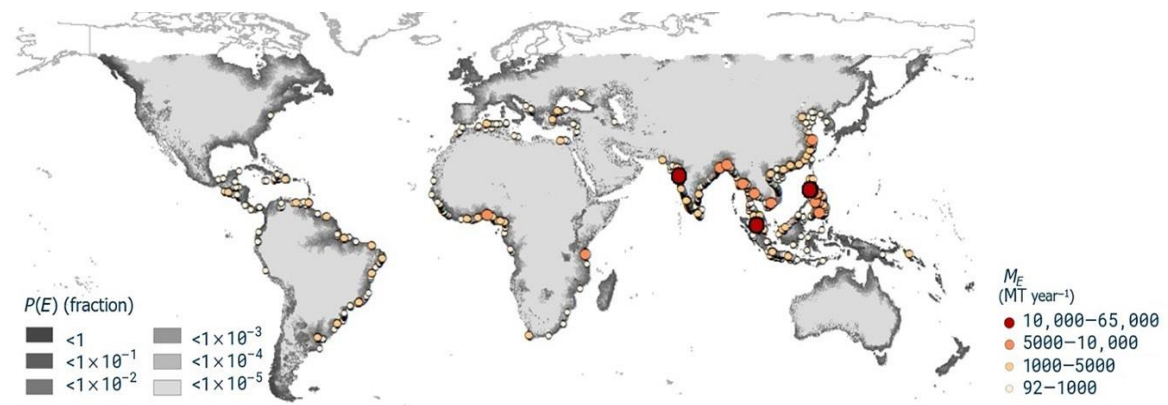


Figure 4 : principales sources de contamination (Meijer et al 2021)

Les côtes asiatiques et indonésiennes sont les plus polluées au plastique. Les déchets sont ensuite transportés par les courants marins et s'accumulent dans les zones de convergence des gyres océaniques. La zone de convergence de la gyre Pacifique Nord concentre les déchets transportés par les fleuves asiatiques. Cette zone a été décrite (à des fins de communication et de sensibilisation) comme le 7^{ème} continent.

Une fois en mer, on suppose que la majorité des plastiques se dégradent sous forme de micro-déchets, coulent, et s'accumulent dans les sédiments. Ainsi, l'Office Français de la Biodiversité

mentionne les travaux de M. Constant, P. Kerhervé, S. Heussner et W. Ludwig du CEFREM de Perpignan dans le golfe du Lion. Les chercheurs ont estimé que 473 tonnes de microplastiques (99.9%) se trouvaient dans les sédiments contre 1,3 tonnes dans les autres espaces (surface + colonne d'eau + plage)⁵.

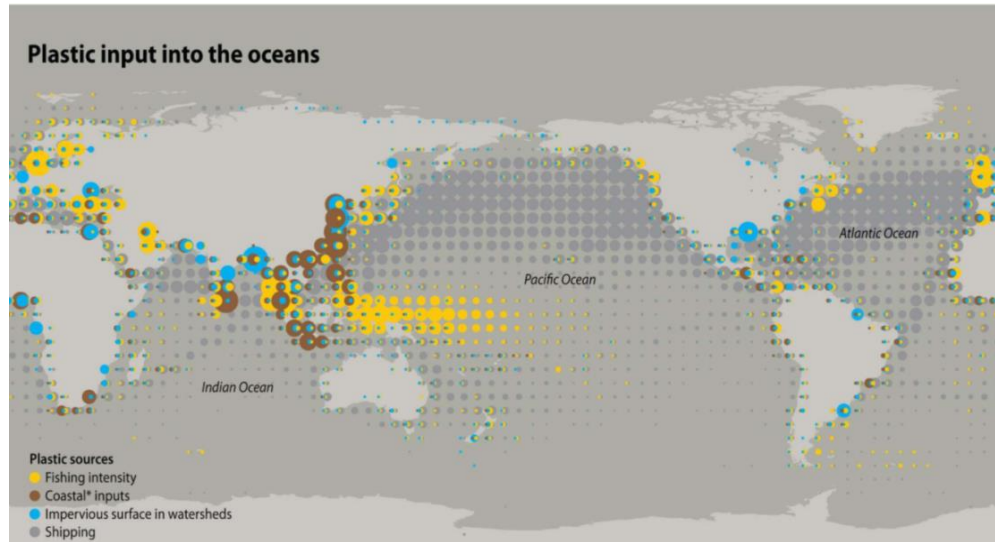


Figure 5 : transports des plastiques dans les océans⁶ (ADEME 2020)

Les mers fermées peuvent être des milieux marins très pollués. Ainsi, la mer Méditerranée est probablement le milieu marin le plus impacté par les pollutions plastiques. En effet, la mer est alimentée par des fleuves drainant des territoires fortement peuplés. Les concentrations moyennes de plastiques y sont du même ordre qu'au cœur des gyres océaniques subtropicales (autour de 500 g/km² selon Cozart et al., 2015⁷) avec des densités plus élevées en macrodéchets.

Les phénomènes de transport peuvent générer des zones d'accumulations importantes comme celle de l'île Roatan (au large du Honduras / Mer des Caraïbes) étudiée par l'entreprise CLS (Figure 6). L'étude montre que dans ce cas, le vent joue un rôle essentiel dans l'accumulation de plastiques.⁸

⁵ Synthèse des premières Rencontres du GDR « Polymères et océans » (24 au 26 juin 2019 à Créteil) et des journées « Plastiques et environnement » (27 et 28 juin 2019 à Champs-sur-Marne)

⁶ Source: IPCC scenario SRES B2 : Jambeck, J. R et al. Plastic waste inputs from land into the ocean, Science 2015.

⁷ Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Palma, A.T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M.L., and Duarte, C.M. ; 2014. Plastic debris in the open ocean Proceedings of the National Academy of Sciences

⁸ Source : entretien avec Dr Marc Lucas en octobre 2021



Figure 6 : photos de plongée lors de l'étude de l'accumulation de l'île de Roatan (source : CLS)

Enfin, les accidents, les crues et les catastrophes naturelles peuvent également être des sources importantes de pollution puisqu'elles risquent d'entraîner le déversement brutal de millions de tonnes de plastiques dans le milieu marin. Par exemple les inondations d'octobre 2021 à Marseille et le lessivage du bassin du Rhône ont générés un déversement massif de déchets en mer (source : Merterre – France inter octobre 2021 - Figure 7)



Figure 7 : Plage du Prado à Marseille après les inondations de 2021 (© AFP / Nicolas Tucat)

1.2. Effets de la pollution plastique en mer

Les impacts des pollutions plastiques sont nombreux. Le rapport du WWF en 2019 alerte sur les impacts environnementaux : enchevêtrement des animaux dans des débris plastiques entraînant des déplacements d'individus, ingestion par les organismes, dommages causés aux habitats naturels par les déchets et finalement impacts sociaux liés à la gestion non réglementée des plastiques, à la contamination des sols et de l'eau et impacts économiques sur les activités de pêche de commerce et de tourisme.

De plus, la dégradation des déchets plastiques génère des microplastiques. Selon Ika Paul-Pont, Docteure au LEMAR (Université de Brest), la dégradation va entraîner la désorption des additifs (phtalates, biophénols ...) de la matrice plastique. Ces perturbateurs endocriniens peuvent être relargués dans le milieu ou en conditions digestives. Dans le milieu, leur impact doit être mis en perspective avec les autres sources de contamination du milieu. En revanche, une fois ingéré, les perturbateurs endocriniens provenant des plastiques impactent directement la faune marine.

En plus d'être des vecteurs de polluants, les plastiques, à l'échelle micro ou nano ont un effet toxique chez les poissons. Dr Bettie Cormier a montré, lors de sa thèse en 2020, que les microplastiques, une fois ingérés de manière chronique par des poissons zèbres, peuvent induire des effets sublétaux sur les juvéniles, mais également sur la progéniture des populations exposées⁹.

L'équipe du professeur Richard Sempere de l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) a montré que la présence de bactéries et l'exposition à la lumière avait un impact positif sur le relargage d'additifs dans le milieu. Cependant, les mêmes bactéries vont assimiler une partie des additifs¹⁰. En contrepartie, la pression a tendance à freiner la diffusion des additifs les plus lourds¹¹.

Un autre impact lié aux pollutions plastiques est le transport d'espèces invasives. On constate que les surfaces sont rapidement recouvertes d'un film de sucre/lipides (éco-corona). Ce film est facilement colonisé par un grand nombre d'êtres vivants (bactéries, virus ...). Le transport des matières plastiques dans les courants océaniques permet à ces espèces de couvrir de très grandes distances et de s'implanter dans d'autres écosystèmes. Par exemple, le plastique rejeté dans l'océan Pacifique en conséquence du tsunami de Sendai au Japon a été transporté jusqu'aux côtes américaines. 200 nouvelles espèces pluricellulaires non-endémiques ont été observées sur les côtes américaines suite à ce transport. Selon le professeur Galgani¹², les pollutions plastiques des milieux marins vont générer une nouvelle phase dans le brassage des espèces et risque de favoriser la dégradation de la biodiversité des écosystèmes par l'implantation d'espèces invasives⁵.

La caractérisation complète de l'impact de la pollution plastique sur les milieux marins reste un sujet de recherche important. En revanche, l'ensemble des experts consultés s'accordent sur le fait que cette pollution existe et que son impact sur les milieux va s'inscrire dans le long terme.

2. Contexte spécifique des espaces maritimes français

2.1. Territoires

Les espaces maritimes sous juridiction française sont représentés sur la carte ci-dessous. Certains espaces sont uniquement liés à des bases militaires ou scientifiques et n'accueillent pas de résidents permanents (Crozet et Kerguelen par exemple). Cette étude considère tous les espaces maritimes liés à des départements et régions d'outre-mer et collectivités d'outre-mer (DROM-COM), soit les territoires encadrés dans la carte ci-dessous (Figure 8). Les propriétés domaniales de l'Etat ou autres territoires peu ou pas habités ne sont pas pris en compte dans cette étude.

⁹ Cormier 2020

¹⁰ Paluselli et al-EST 2019

¹¹ Fauvelle et al. 2021

¹² Source : entretien de juillet 2021

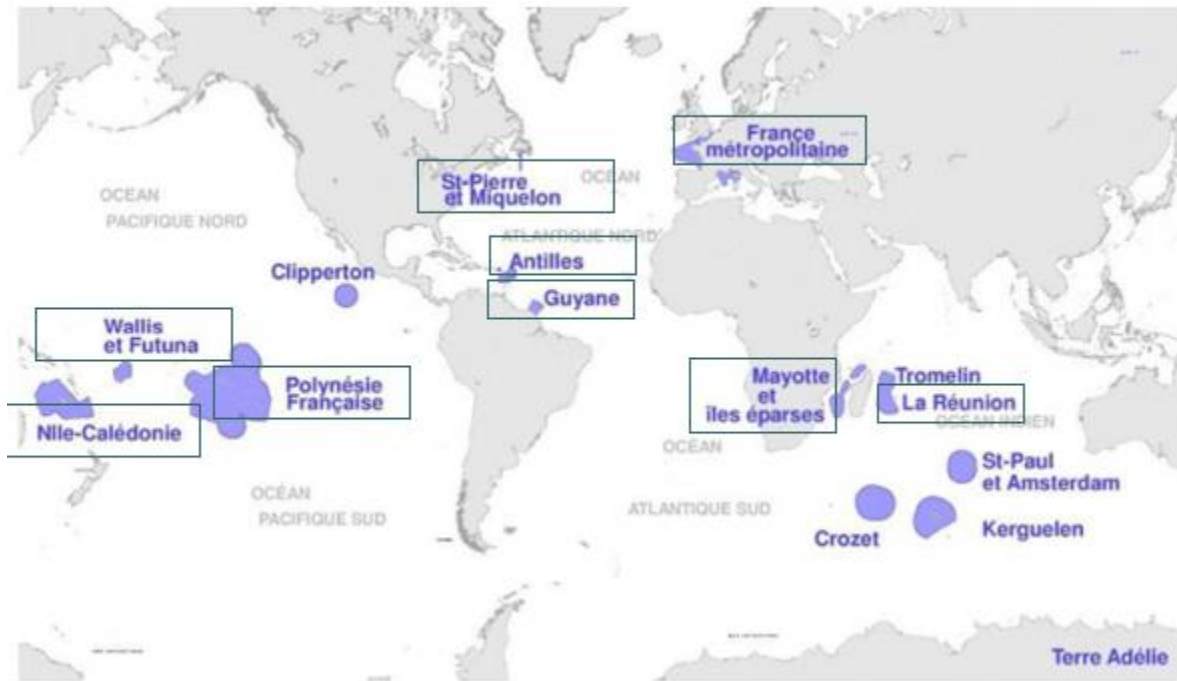


Figure 8 : Espaces maritimes sous juridiction française et concernés par l'étude

2.2. Gestion des déchets dans les DROM-COM

Comme partout en France, la collecte des déchets ménagers dans les DROM-COM est faite de trois manières : en déchetterie, en collecte sélective et en collecte des OM résiduelles. La base SINOE recense 13 centres de tri de collecte sélective et 20 unités de traitement OMR dans les DROM-COM. Ces équipements peuvent être utilisés pour traiter, valoriser ou recycler des déchets marins, à condition que le tri et le nettoyage éventuel soient réalisés par le collecteur.

En général, la faible quantité de gisement produit par chacun des DROM-COM limite la structuration de filières de traitement par incinération ou de valorisation locales. La base SINOE ne recense que deux unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM) sur l'ensemble du territoire ultramarin français : une unité de 115 000 tonnes/an à la Martinique et une unité de 8 900 tonnes/an à Saint Barthélemy (Figure 9).



Figure 9 : Unité d'incinération à la Martinique (gauche) et à Saint Barthélémy (droite)

La majorité des équipements de traitement en exploitation est constituée d'unités d'enfouissement (Installation de Stockage de Déchets Non-Dangereux ou centre de stockage et Centre d'Enfouissement Technique de classe 2). La convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontaliers de déchets (et l'intégration des déchets plastiques dans le champ d'application de la convention) freine le potentiel de gestion régionale des déchets sur les territoires ultramarins. De plus, des verrous économiques freinent également leur valorisation locale, voire leur rapatriement vers l'hexagone (manque de lignes). Ainsi, les déchets collectés sélectivement sont en général triés dans les centres de tri locaux puis exportés vers des unités de recyclages localisées en Europe ou en Asie.

Néanmoins, la construction d'un certain nombre d'Unités de Valorisation Energétique (UVE) est prévue d'ici 2025, entre autres :

- 3 en Guadeloupe
- 1 à la Réunion, dont la construction a déjà commencé
- 1 à Saint-Martin
- 1 en Guyane.

Tous ces équipements peuvent être utilisés pour valoriser les déchets plastiques collectés en mer. La mutualisation des flux pour intégrer des filières existantes de traitement des déchets ménagers sur les territoires concernés ou à l'export est une voie à envisager. Cette alternative étudiée dans les prochaines parties de cette étude pour tout ou une partie du gisement (paragraphe 0 - Phase 2 : Description des solutions techniques et définition des filières).

3. Caractérisation du gisement

3.1. Identification du gisement

3.1.1. Identification par l'analyse du territoire

Les résultats des études sur les émissions plastiques en milieu marin sont publiés sous forme de carte par [The Ocean Cleanup](#) (Figure 10). Cet outil permet d'estimer les émissions plastiques à partir de l'analyse du territoire et en tenant compte de la probabilité d'émission.



Figure 10 : Emissions plastiques estimés par l'analyse du territoire - exemple de la Baie de Fort de France (Martinique)

En France, 417 sources d'émissions sont évaluées. Au total, 280 tonnes de plastiques seraient déversées annuellement à partir des territoires français dans les milieux marins (Tableau 1).

Tableau 1 : Bilan de la quantité de déchets sauvages produits par territoire

Bilan	Nombre de points	Total
Martinique	18	7 800 kg
Guadeloupe	14	4 000 kg
Guyane française (dont fleuves frontières)	13	40 700 kg
France hexagonale	186	227 800 kg
Dont Manche / Atlantique	133	141 700 kg
Dont Méditerranée	53	86 100 kg
Total	417	280 300 kg

Les données actuellement publiées montrent que plus de 80 % du plastique émis par la France dans le milieu marin proviendrait de l'hexagone (Figure 11). La Guyane française est également un émetteur important, mais ces émissions proviennent essentiellement des deux fleuves frontières du territoire : l'Oyapock et le Maroni. Aucune donnée d'émissions n'est estimée pour les territoires français de l'océan Indien ou du Pacifique.

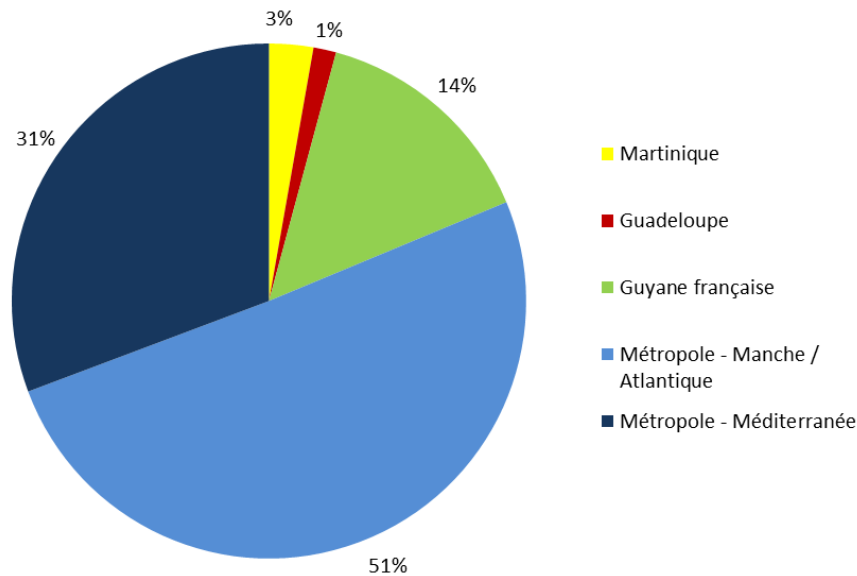


Figure 11 : Estimation des émissions plastiques à partir des territoires français.

Les territoires ultramarins français sont presque tous des territoires insulaires. Leur réseau hydrographique est composé de nombreuses « petites » rivières directement connectées à la mer. Mis à part la Guyane, il n'y a pas d'estuaire important ni de grand bassin versant. A titre d'exemple, le plus grand bassin versant de la Martinique est la rivière Lézarde (116 km²). L'île de la Réunion compte 13 rivières pérennes pour une surface totale de 2 500 km² et une population de 855 000 habitants. A titre de comparaison, le bassin du Rhône couvre plus de 98 000 km² pour une population de 15,5 millions d'habitants. De plus, la population vit essentiellement en bord de mer. Sur les 20 villes les plus peuplées des DROM-COM, seulement 2 (Les Abymes à la Guadeloupe et Saint Laurent du Maroni à la Guyane) ne sont pas des villes littorales. Les travaux de Meijer et al. (2021) montrent que les estuaires des rivières urbaines sont des lieux d'émissions plastiques significatifs.

Dès lors, il paraît raisonnable de considérer sur le territoire ultramarin français que les sources prioritaires d'émissions plastiques sont :

- Le lessivage urbain lors de pluies, de tempêtes et de crues.
- Les rejets directs par les habitants en bord de mer ou en bord de cours d'eau ;
- Les décharges sauvages ou l'érosion d'anciennes décharges ;
- Les émissions liées aux activités sur le territoire :

- Les activités économiques comme la pêche, l'industrie ou l'agriculture ;
- Les usages spécifiques comme le tourisme ou les pique-niques...

La direction régionale Réunion – Mayotte de l'ADEME a conduit une mission de caractérisation de l'impact des macrodéchets sur les milieux aquatiques (eaux douces et marines). Cette mission de terrain a permis de montrer, sur deux bassins versants à Mayotte, que les déchets plastiques sont les macrodéchets majoritaires présents dans les rivières. Sur ce territoire, ces déchets proviennent de la construction, de l'alimentation et des activités ménagères. On trouve également des déchets liés à la présence de populations clandestines. Les déchets sont souvent le fait de rejets directs par les habitants situés en bordure de cours d'eau¹³.

L'analyse du territoire ne permet pas, à ce jour, d'estimer de manière satisfaisante les émissions plastiques en milieu marin. Les travaux publiés par The Ocean Cleanup doivent être complétés par l'analyse des phénomènes météorologiques, des comportements et de la culture des habitants et des activités économiques du territoire.

3.1.2. *Identification par satellite*

Le gisement plastique à l'échelle mondiale peut être caractérisé par la technique du tracking. Des déchets équipés de balises argos sont déposés dans l'environnement et suivis. Les zones d'accumulations peuvent être identifiées en fonction des saisons, de la météo et des courants. A partir du tracking et de validation de terrain, il est possible de modéliser le transport de plastiques et d'anticiper les zones d'accumulation.

Des développements sont en cours pour pouvoir identifier directement les plastiques par satellite. Ces technologies ne sont pas matures à ce jour. La caractérisation du gisement par résine à partir d'observations satellite serait probablement possible, à condition de s'appuyer sur les caractéristiques physiques des résines.

Les technologies satellites peuvent avoir une valeur ajoutée significative dans la caractérisation du gisement plastique en mer. Ces études ne sont pas réalisées à ce jour sur le territoire français. La majorité des publications portent sur les plastiques issus des territoires les plus émetteurs (Asie et Indonésie). Ces technologies ne permettent d'identifier que les macro plastiques flottants puisque l'analyse de la colonne d'eau n'est pas possible par satellite.

3.1.3. *Tonnages annuels collectables*

La seule technique permettant d'identifier de manière certaine l'émission de plastiques est la campagne de caractérisation sur le terrain. Les outils de modélisation ou d'observation satellite ne sont pas encore assez précis pour apporter des résultats exploitables sur le territoire français.

¹³ ADEME 2011 : rapport final Mission d'assistance à la caractérisation et définition de l'impact des macro-déchets en milieu aquatique (eaux douces et marines) : Etat des lieux et recommandations

Il est donc crucial et indispensable de réaliser une campagne locale de caractérisation en amont de chaque projet, de manière à déterminer spécifiquement la composition du gisement et assurer le dimensionnement de la filière de collecte / valorisation / traitement. En effet, la caractérisation peut s'avérer utile pour plusieurs raisons :

- Au niveau des décideurs publiques, la caractérisation du gisement à l'échelle du territoire permet d'identifier les technologies les plus adaptées au regard du gisement mais aussi des débouchés potentiels, et les possibilités de mutualisation de flux ;
- Pour le porteur de projet, la caractérisation est essentielle pour cibler les technologies adaptées et les débouchés économiques pour garantir la rentabilité du projet.

La méthodologie de caractérisation doit être développée et généralisée pour que les différents travaux puissent être comparables et reproductible. Enfin, les mesures faites lors des caractérisations doivent correspondre à une logique « déchets ». Le gisement doit être caractérisé en masse et non en nombre d'objet.

3.2. Qualification du gisement

3.2.1. Qualification à partir des observations de terrain

La qualification des plastiques sauvages, aquatiques et marins est réalisée par un grand nombre d'acteurs. La plupart ont des actions de caractérisation des déchets collectés. Ces collectes peuvent porter :

- Sur les déchets produits sur la plage (poubelles de plage)
- Sur les déchets échoués (ramassages, bacs marées)
- Sur les filets de pêche en fin de vie ou perdus en mer.
- Sur les déchets flottant ou semis flottant en mer (pêche passive)

Les résultats de ces caractérisations montrent une majorité de plastiques (Figure 12/ Figure 11). Mis à part dans le cas spécifique des filets de pêche (en PA), il n'y a pas de caractérisation des plastiques par résine réalisée par les collecteurs de macrodéchets.

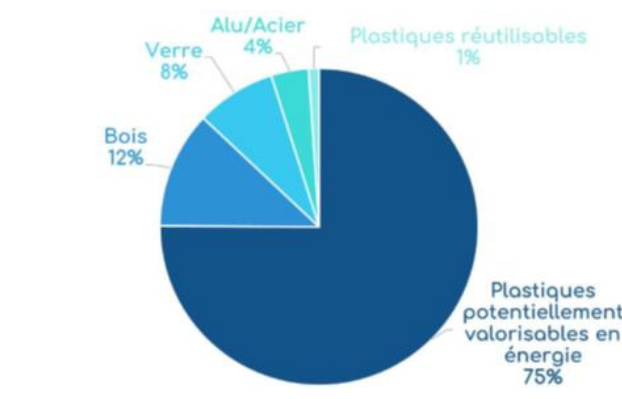


Figure 12 : Exemple de résultats de caractérisation des déchets sauvages marins

Toutefois, ces caractérisations ne permettent pas de qualifier le gisement de plastique (par résine) à traiter dans les déchets.

Les macrodéchets une fois dans le milieu marin, se dégradent et relarguent des microplastiques. Plusieurs équipes de recherche travaillent sur le devenir et les impacts des plastiques dans l'environnement aquatique. Ils ont formé un groupement de recherche : le GDR polymères & océan¹⁴. Ces équipes réalisent des caractérisations par résines.

Selon la Docteure Ika Paul-Pont, les proportions de microplastiques présents sont une bonne estimation des macroplastiques du milieu. Dans la baie de Brest, par exemple, le LEMAR collecte en surface, un gisement de PE, de PP et de PS (liste hiérarchisée). Le PET n'est pas présent sous la forme de microplastique. On peut supposer qu'avant dégradation (sous forme de bouteille) il flotte et coule en se dégradant (densité supérieure à celle de l'eau). Les microfibrilles de PET se retrouvent donc en fond. Au même titre, le PVC coule probablement également dès son arrivée dans le milieu aquatique.

3.2.2. *Caractérisation à partir des activités économiques du territoire*

Le gisement peut être caractérisé à partir des utilisateurs de plastique. Par exemple on estime qu'il y a en permanence 25 millions d'unités plastiques en mer en Charente Maritime¹⁵. Ce plastique est lié à l'activité conchylicole (Figure 13) :

- Poches ostréicoles en PEHD
- Coupelles en PET
- Tubes en PVC



Figure 13 : plastiques issus de l'activité conchylicole

Ce mode de caractérisation dépend des activités présentes sur le territoire. Dans les zones conchylicoles, le PEHD, le PET et le PVC seront surreprésentés. Dans les zones de pêche, on trouvera

¹⁴ <https://www.gdr-po.cnrs.fr/index.html>

¹⁵ Source : Entretien Fabrice Faurre - TEO La Rochelle – septembre 2021

plutôt du PA et du PSE en quantité importantes. Dans les zones touristiques, on peut s'attendre à une répartition plus proche des ordures ménagères.

3.2.3. *Caractérisation à partir des ordures ménagères*

La caractérisation des ordures ménagères la plus récente est le MODECOM 2017 pour la France hexagonale. La répartition des plastiques dans les ordures ménagères est la suivante (Tableau 2) :

Tableau 2: Répartition des OMA (OM résiduelles + collectes sélectives) selon le MODECOM 2017

	% OMA	% plastiques	% plastiques	% résines retenus
Sacs poubelles	1,8%	13,6%	PEBD	40,9%
Autres sacs	0,6%	4,8%	PEBD	
Autres films	3,0%	22,5%	PEBD	
Bouteilles et flacon PET	1,9%	14,4%	PET	14,4%
Autres bouteilles et flacons	0,8%	6,0%	PEHD	6,0%
Autres emballages	3,4%	25,2%	PP/PS	25,2%
Autre plastiques	1,8%	13,6%	Autres	13,6%

On peut estimer qu'une part constante des plastiques issus des ordures ménagères est émis dans l'environnement sous forme de déchet sauvage. La caractérisation du gisement de plastique sauvage est alors proportionnelle au plastique présent dans les ordures ménagères.

Cette estimation peut être appliquée localement à tous les territoires ayant réalisé une caractérisation MODECOM.

3.2.4. *Caractérisation à partir de la mise sur le marché des plastiques*

Le gisement peut être caractérisé à partir de la mise sur le marché de résines par les producteurs. En 2019, 50,7 millions de tonnes de plastiques ont été mis sur le marché européen. La répartition par résine et par marché montre la prépondérance des secteurs de l'emballage et du bâtiment (Figure 14)¹⁶.

¹⁶ Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH - Plastics the facts 2020

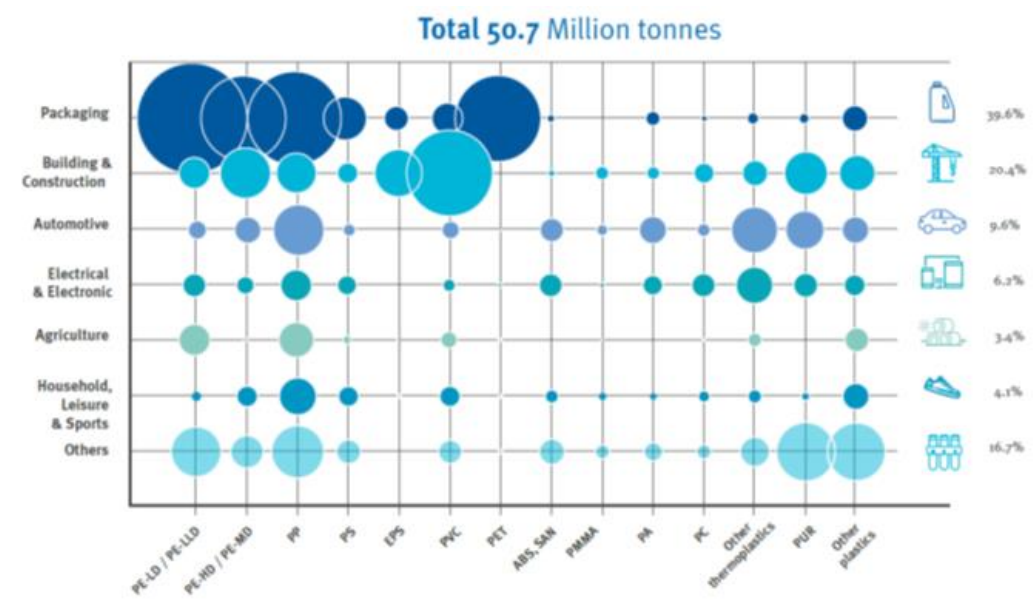


Figure 14 : Caractérisation des plastiques mis sur le marché

Environ 50 % du plastique mis sur le marché est à usage d'emballage. Cette part augmente dans les déchets (environ 2/3) puisque les autres usages des plastiques (BTP, textile ...) ont des durées de vie plus longues.

L'analyse par résine (Figure 15) montre que les ratios mis sur le marché sont proches des ratios trouvés dans les ordures ménagères, à l'exception du PVC essentiellement utilisés dans le secteur du bâtiment, et qui ont une durée de vie plus longue.

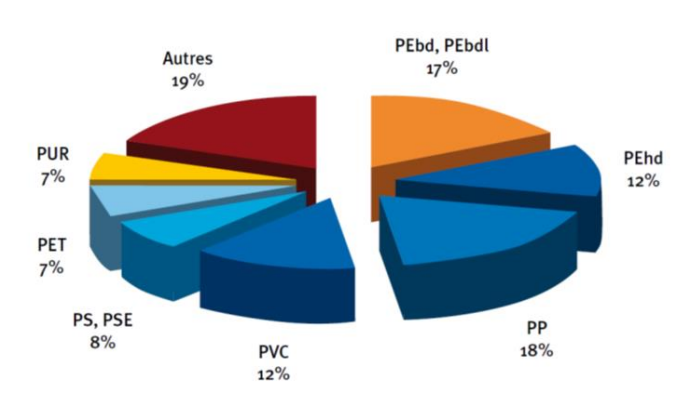


Figure 15 : Répartition des résines plastiques à la production

3.2.5. Niveau de dégradation

Dans le milieu naturel, le plastique est transporté et évolue de différentes façons. Lors de son déversement dans le milieu aquatique (lessivage urbain par exemple), le plastique peut être fortement pollué (hydrocarbures, matières organiques par exemple) mais peu dégradé. Cette pollution est rapidement lessivée par le milieu aquatique.

Dans le milieu aquatique, un film de sucres et de lipides se forme à la surface du plastique (éco-corona). Ce milieu héberge des espèces vivantes et, éventuellement, accumule des polluants. L'évolution de l'éco-corona lors du cycle de vie des plastiques dans le milieu naturel est un des sujets d'étude importants.

La majorité des plastiques se dégrade rapidement par exposition au rayonnement UV. Cette dégradation crée des pores qui augmentent la surface spécifique de la matière. Dans un milieu aquatique pollué, en parallèle du phénomène de lessivage, le plastique adsorbe et concentre les éléments présents dans le milieu. Ces éléments sont désorbés lors de la dégradation du plastique, soit dans le milieu naturel (marin) soit en condition digestive, directement dans le corps de certaines espèces animales.

Lors de crues, le déchet est transporté vers l'aval, mais il subit également des mouvements latéraux vers les berges. Il peut donc, en fonction de la géographie du bassin versant, et du volume de crue, sortir du milieu aquatique et devenir (ou redevenir) un déchet sauvage. Ces phénomènes ont tendance à favoriser la dégradation du plastique. De fait, lors de son déversement en milieu marin, la majorité des déchets aquatiques est transformé en micro-plastiques.

Le niveau de dégradation des macrodéchets sauvages, aquatiques ou marins dépend donc de plusieurs facteurs :

- La géographie du bassin versant
- La météo locale (vent, pluviométrie, ensoleillement ...)
- La nature de la résine
- Le niveau de pollution du milieu

En fonction de ces facteurs, le déchet peut être qualifié de sauvage (terrestre), d'aquatique ou de marin. Son niveau de dégradation dépend de son cycle de vie.

Comme détaillé précédemment, il est probable, dans le cas des territoires ultramarins français, que les déchets soient peu transportés avant d'arriver en mer et donc peu dégradés (du fait de réseau hydrographique plutôt constitué de petites rivières que de grands fleuves). Il sera donc considéré que leur état est relativement peu altéré.

Néanmoins, durant l'analyse technique des technologies de traitement, le critère « propreté du gisement » (taux d'humidité, proportion de sel et de sable ou autres inertes, proportion de biomasse et autres résidus organiques, liées au séjour dans l'eau douce ou de mer) est un critère étudié avec attention puisqu'il détermine les filières de traitement mises en place. Sur la base d'un retour d'expérience (confrontation avec des acteurs du recyclage après caractérisation lors d'une étude S3d Ingénierie sur la collecte et la valorisation de macrodéchets flottants collectés dans la lagune d'Abidjan en Côte D'Ivoire), l'hypothèse est posée, **pour le présent cas d'étude, que 15 % du gisement de plastiques recyclable est trop dégradé après le séjour dans l'eau douce ou de mer pour pouvoir intégrer les filières de valorisation mécanique.**

La dégradation des macroplastiques est également un indicateur important sur la probable génération de microplastiques puisque les diverses études suscitées et les résultats d'entretiens montrent qu'ils proviennent :

- De la dégradation des tissus lors des lavages en machine ;
- Des résidus de pneus lessivés par la pluie sur les routes ;
- De l'érosion et la dégradation des macro-plastiques dans le milieu naturel.

Des caractérisations de terrain sont nécessaires. Ces caractérisations doivent être conduites selon une méthodologie normée. Elles doivent permettre d'identifier les plastiques par résine, à la différence de la méthodologie OSPAR par exemple.

4. Conclusions de la phase 1

La problématique de la pollution marine par les plastiques donne lieu à de nombreux travaux. A ce jour, il est encore délicat de caractériser précisément la pollution. Il n'y a également pas de consensus scientifique sur les impacts réels de cette pollution sur les écosystèmes, sur la santé ou encore sur les activités humaines, que ce soit à l'échelle géographique visée par cette étude (DROM-COM) ni même à l'échelle internationale.

Le territoire français se différencie par rapport à la problématique internationale de la pollution par les plastiques. Tout le territoire est équipé d'un système de collecte sélective des déchets. Tous les déchets (ménagers et autres) doivent être collectés et traités dans des filières appropriées.

Les DROM-COM, dans lesquels est situé la majorité de l'espace maritime français, ont une densité de population relativement faible. La majorité des habitants sont localisés dans des villes côtières. De plus, ces territoires sont dessinés par réseau hydrographique constitués de très petits cours d'eau. Ainsi, sur ces territoires, le gisement de plastiques présent dans les milieux aquatiques et marins a probablement été peu transporté et peu transformé. On peut également s'attendre à ce que les plastiques présents dans ces milieux soient, en composition, comparables aux déchets ménagers de ces territoires. **Ces hypothèses seront, dans un premier temps, retenues pour la suite de l'étude. En revanche, elles ne peuvent constituer une affirmation définitive et il est important de rappeler que pour tout projet, une campagne de caractérisation amont est une étape primordiale et incontournable qui doit avoir été menée au préalable.** C'est bel et bien cette caractérisation qui permet d'identifier les solutions techniques accessibles et de concevoir des filières de valorisation pertinentes.

La composition physique et chimique du plastique sauvage, aquatique ou marin varie en fonction des paramètres suivants :

- La nature du producteur de déchet : en fonction du territoire le ratio entre les plastiques provenant des déchets ménagers et les Déchets d'Activité Economiques (DAE) pourra être très différent

- Les activités du territoire : les territoires touristiques, les zones conchylicoles, les zones de pêches, les zones fortement industrialisées, les territoires densément peuplés (...) auront des pollutions plastiques très différentes.
- La taille du bassin versant et la densité de population du territoire : en contexte insulaire, on trouve un grand nombre de petites rivières alors que les continents sont drainés par des grands fleuves.
- Les conditions météorologiques locales et notamment le vent, la pluviométrie et l'ensoleillement du territoire.
- Les comportements ponctuels des habitants comme la collecte spécifique de certains plastiques, des utilisations particulières (les poches PE en Afrique par exemple)
- Le niveau d'industrialisation, d'urbanisation du territoire ainsi que son niveau de développement économique.
- L'existence de crises majeures : crises climatiques (et leur nature), crises sanitaire, crises sociales ...
- Le niveau de pollution du milieu récepteur et l'effet « éponge » éventuel de certaines résines.
- La nature chimique des matières plastiques et des additifs utilisés

L'ensemble de ces variables impacte directement la nature du gisement dans sa taille, sa composition physique et sa composition chimique. Il n'existe donc pas, à ce jour de modèle permettant de prévoir la composition du gisement de plastique sauvages. Dans cette étude, il est considéré que le gisement de plastique en mer est comparable aux ordures ménagères. L'impact d'une présence plus importante de certaines résines sera toutefois analysé (Partie 3)

Devant ce constat, seront retenues pour cette étude les hypothèses suivantes :

- Estimation d'une composition théorique générique à partir des déchets ménagers assimilés (OM résiduelle + collecte sélective) sur la base MODECOM 2017.
- Etude sur deux tailles de gisement : 500 t/an et un gisement d'une taille suffisante pour garantir la rentabilité économique des filières de recyclage mécanique

Phase 2 : Description des solutions techniques et définition des filières

Dans cette deuxième phase, un benchmark technologique a été réalisé afin d'identifier et de qualifier les technologies capables de répondre au besoin préalablement défini. La recherche de technologies a été réalisée suivant les thématiques suivantes :

- Les technologies ou les modes de collecte et de ramassage des déchets ;
- Le prétraitement des plastiques en mélange (tri, lavage, broyage) ;
- La valorisation matière ;
- La valorisation chimique ou énergétique.

La difficulté réside dans la relation entre ces différentes briques puisque qu'à chaque étape, les technologies sélectionnées influent directement sur les choix technologiques en aval. Par exemple, le choix de la technologie de collecte influe sur la composition du gisement, qui détermine les technologies de tri ou de lavage à implémenter. Ces technologies de tri ou de lavage influent à leur tour sur les possibilités de recyclage matière et ainsi de suite.

Une attention particulière a été portée à l'évaluation des technologies suivant leur opérabilité à petite échelle (quelques centaines à quelques milliers de tonnes par an).

5. La collecte

1.1. Collecte « mobile »

1.1.1. *Collecte manuelle*

Une des méthodes les plus courantes pour la collecte des déchets est la collecte manuelle (Tableau 3). Elle consiste à mandater des opérateurs (associations, bénévoles ou salariés) pour réaliser la collecte à des endroits spécifiques voire stratégiques : les plages, les ports, les fleuves, les ouvrages hydrauliques...

Deux systèmes sont alors recensés :

- La mise en place de collectes régulières (journalière, hebdomadaire) réalisées par des agents salariés mandatés pour assurer la propreté de l'espace ou par des bénévoles / utilisateurs de l'espace (modèle de bac à marée)
- L'organisation de collectes ponctuelles par des associations, reposant sur l'action de bénévoles, avec l'aide de kits pour le bon déroulement. Le ramassage se déroule alors en trois étapes, une première de sensibilisation et de cadrage des bénévoles, une seconde de ramassage et une dernière de conclusion.

La première solution permet une collecte régulière et donc à priori plus efficace. Cependant dans le cas où elle est effectuée par des agents, elle nécessite la mise en place de statuts métiers, des dépenses liées à la main d'œuvre et des concertations entre les différents intervenants (communes le long d'un même fleuve par exemple). En effet, par exemple le terme littoral n'a pas de sens

juridique précis et le partage de l'autorité administrative ou de la responsabilité dans le nettoyage y est complexe ¹⁷:

- Selon la circulaire du 14 mai 1974, c'est aux communes d'assurer le nettoyage du littoral fréquenté par le public et la périodicité du ramassage est fixée par un arrêté municipal.
- Néanmoins la loi n°75-663 du 15 juillet 1975 fixe la règle du « pollueur-payeur » selon laquelle le traitement et l'élimination du déchets revient au producteur
- Les ports maritimes sont également tenus par des obligations de collecte et traitement de même que les navires au large

La deuxième permet de réaliser des collectes à moindre coût et de collecter un grand nombre de déchets tout en menant des actions de sensibilisation. Cependant elle nécessite des planifications régulières et permet de ne collecter que les plastiques qui échouent et s'accumulent à certains endroits.

En termes de capacité de collecte, il est estimé qu'une personne peut collecter environ 200 kg de déchets par jour, soit environ 50 t/an. Le coût de la main d'œuvre dépend des modalités de collecte (salariés, bénévoles, emplois de réinsertion etc.).

La collecte manuelle est décrite comme une méthode de collecte respectueuse de l'environnement, particulièrement vis-à-vis de la faune et de la flore locale. La collecte perturbe très peu le milieu naturel (peu ou pas de dégradation de la structure du sol, peu d'érosion et donc pas de suppression des éléments nutritifs, pas ou peu de destruction des habitats naturels).

En revanche une attention particulière doit être portée sur les différences territoriales pouvant survenir quant à la difficulté de mobiliser la main d'œuvre. En effet, le retour d'expérience permet de mettre en évidence deux types de réactions distinctes :

- Considéré comme vecteur d'émancipation via la création d'association de femmes pour la gestion et l'encouragement de la microéconomie (Afrique de l'Ouest en particulier)
- Considérées comme des tâches indignes, en lien avec l'Histoire du territoire (aux Antilles par exemple).

NOTE – La collecte manuelle peut également concerner les fonds marins en faisant intervenir des plongeurs. Dans ce cas, les capacités de collecte et les coûts associés sont peu connus. Quelques exemples peuvent être cités à la Martinique (Brigade d'Intervention Maritime de l'AssoMer¹⁸) :

- Intervention de 6 personnes dont 2 scaphandriers sur une journée pour la récupération de 2 filets de pêche

¹⁷ Pauline Rayer, Rennes Université Haute Bretagne et ODEM, « Macrodéchets et pratiques de nettoyage des plages du littoral du Morbihan : Etat des lieux », 2009

¹⁸ Brigade d'Intervention Maritime de l'AssoMer, « Extraction des déchets aquatiques impactant le milieu marin – Présentation du projet et bilan des actions » - 2017-2018

- Intervention de 2 personnes sur une journée pour la récupération d'un filet de pêche
- Intervention de 79 personnes (plongeurs loisir et professionnels et scaphandriers professionnels) et de 5 bateaux sur 3 jours pour la récupération de 800 kg d'engins de pêche fantômes et autres déchets sur les fonds marins

Tableau 3 : Caractéristiques techniques de la collecte manuelle

Caractéristiques techniques – Collecte manuelle	
Compartment environnemental visé	<ul style="list-style-type: none"> - Interface terre-mer : eaux littorales, plages, eaux de transition (estuaires, lagunes) - Bassins versants : lacs, rivières, fleuves sur ouvrage hydraulique ou berges
Spécification des déchets collectés	Macrodéchets Pièces entières
Capacité de traitement	50 t/an/personne
Maturité / TRL	Mature
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Raisonne la collecte - Préserve la richesse écologique du milieu - Limite la quantité de sable et/ou d'algues, ou autre, envoyée en centre de traitement - Permet de séparer les déchets par type et résine
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite de créer un cadre de concertation entre communes du bassin versant et gestionnaires d'ouvrage par exemple - Coût main d'œuvre si non bénévoles - Nécessite de définir des statuts métiers pour formaliser la démarche - Nécessite des planifications régulières - Efficacité plus faible que la collecte mécanique

1.1.2. *Nettoyage mécanique*

Le nettoyage mécanique est une méthode développée en parallèle ou en remplacement de la collecte manuelle. Il s'agit de faire intervenir des engins sur les plages ou les berges pour effectuer le ramassage des déchets. Ces engins peuvent être conduits par des opérateurs, pilotés à distance ou autonomes. Il existe un nombre très varié d'engins disponibles sur le marché, qui permettent de ratisser et cribler la plage.

- Les cribleuses permettent de prélever une couche de sable d'environ 5 à 30 cm et de le tamiser. La maille peut être comprise entre 15 et 25 mm de diamètre
- Les ratisseuses permettent de ratisser le sable sur environ 5 cm, grâce à des dents espacées de quelques centimètres

La capacité de collecte est très variable. Elle dépend du type d'engin utilisé et de sa fréquence d'utilisation.

La collecte mécanique est estimée à 2,3 fois plus chère que collecte manuelle¹⁹. Cette méthode présente également des inconvénients en termes d'impacts environnementaux :

- Les engins mal utilisés prélèvent des quantités importantes de sable, ce qui modifie l'équilibre sédimentaire de la dune et provoque de l'érosion
- Les débris organiques (laisse de mer) sont prélevés, supprimant leur impact bénéfique sur l'écosystème (base de la chaîne alimentaire, lieux de nidification, apport de nutriments)

En général la collecte mécanique ne suffit pas puisqu'elle ne permet pas de collecter les déchets dans des endroits difficiles d'accès et la collecte manuelle doit tout de même être mise en œuvre. La répartition entre collecte manuelle et mécanique peut également être impactée par le stress environnemental de la zone concernée (Tableau 4) :

Tableau 4 : Type d'intervention de collecte suivant le stress environnemental de la zone

	Critères	Type d'intervention
Zones à forts enjeux touristiques	Secteurs fréquentés Plages artificielles/urbaines Plages surveillées	Nettoyage mécanique + sensibilisation
Zones à forts enjeux environnementaux	Richesse écologique Présence de dunes	Nettoyage manuel
Zones à très forts enjeux environnementaux	Présence d'oiseaux nicheurs Richesse écologique Présence de dunes	Nettoyage manuel hors périodes de nidification

1.1.3. Filets ou collecteurs en mer

Le chalutage consiste en la mise en place derrière un bateau ou entre deux bateaux d'un chalut permettant de collecter, suivant la taille du filet, un certain nombre de déchets, des hydrocarbures aux macrodéchets, tout en laissant passer l'eau (Figure 16, Tableau 5). Les déchets sont confinés vers le centre du chalut pour être dirigés à travers un filtre. Une fois le chalut plein, il est ramené vers la terre pour être déchargé, ou pour les chaluts de taille plus importante qui ne peuvent pas être déplacés, des embarcations réalisent des allers-retours vers la terre pour le déchargement.

La quantité de déchets récoltés dépend de la taille du chalut, de l'embarcation utilisée et du temps passé. En effet, il existe une variété considérable de modèles (Thomsea, C to sea...) pour des envergures allant de 6 à 500 m. Le type de déchets récoltés est orienté via la taille des mailles du filet installé sur le chalut.

¹⁹ Pauline Rayer, Rennes Université Haute Bretagne et ODEM, « Macrodéchets et pratiques de nettoyage des plages du littoral du Morbihan : Etat des lieux », 2009



Figure 16 : Chalut développé par Thomsea

D'un point de vue économique, les consultations fournisseurs permettent d'estimer grossièrement le coût d'investissement autour de 400 € par tonne collectée annuellement, tout type de navire confondu. Les coûts opératoires quant à eux incluent la maintenance, la main d'œuvre et le carburant et sont estimés à 60-70 € par tonne collectée (tout type d'engins confondus) et dépend bien entendu du cours du pétrole.

Concernant les impacts environnementaux de ce type de collecte, ils sont difficiles à évaluer puisque très dépendant des paramètres suivants :

- Type de motorisation du bateau
- Taille du bateau et capacité de collecte
- Distance de trajet.

De plus, peuvent se poser les questions suivantes :

- Les animaux pris dans les chaluts sont-ils relâchés sans dommages ?
- Le trafic induit par la circulation des bateaux peut-il gêner la faune et la flore locales ?

Ces interrogations doivent guider la mise en place de projets de collecte par chalut mais, à ce stade, aucune généralité ne peut être faite.

Tableau 5 : Caractéristiques techniques des filets collecteurs ou chaluts

Caractéristiques techniques – filets ou collecteurs	
Compartment environnemental visé	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux de mer - Eaux littorales - Eaux de transition (estuariers, lagunes) - Lacs, rivières, fleuves
Spécification des déchets collectés	Macrodéchets à partir de 3 à 20 mm pour les plastiques Pièces entières Collecte également les autres déchets (métal, verre, organiques) Collecte possible des hydrocarbures liquides
Capacité de traitement	<ul style="list-style-type: none"> - Envergure de 6 m (300 kg de déchets) à 500 m - Ocean Cleanup / Thomsea / C to Sea
Maturité / TRL	Maturité industrielle (400 chaluts vendus internationalement pour Thomsea)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de collecte (ex : 10 t d’HC en 30 min) - Filets et chaluts adaptables sur un grand nombre de bateaux et pour plusieurs compartiments environnementaux
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de faire appel à des opérateurs - Utilisation de bateaux

1.1.4. Robots

Il existe également des systèmes de récolte robotisés qui aspirent les déchets flottants, fonctionnant soit en navigation autonome soit de manière téléguidée (Figure 17, Tableau 6). Ces systèmes sont plutôt adaptés à des lieux comme les marinas, les ports ou encore les lacs et étangs, où les déchets sont concentrés. Les robots sont autonomes et la plupart du temps alimentés en énergie solaire. Une fois les filets ou casiers pleins, ils sont déchargés par des opérateurs à terre.





Figure 17 : Robots développés par Geneseas/Recyclamer (haut gauche), Jellyfish boat de lady (haut droite) et SeaVax (bas)

En ce qui concerne les données économiques, la seule information disponible est le coût d'investissement pour un Jelly Fish boat qui est de l'ordre de 10 000 €²⁰.

Pour ce qui est de l'impact environnemental, ces robots sont généralement alimentés par de l'énergie solaire (émissions quasi-nulles mais question des ressources). Si leur utilisation est continue, leur conception doit permettre de ne pas perturber la faune et la flore locale, point sur lequel peu de données sont disponibles.

²⁰ CITEO et ECOGEOS, 2021, « Etude relative à l'élaboration d'un état des lieux partagé des connaissances sur la thématique des déchets diffus »

Tableau 6 : Caractéristiques techniques des robots collecteurs

Caractéristiques techniques – Robots collecteurs	
Compartment environnemental visé	<ul style="list-style-type: none"> - Marinas - Ports - Etangs, lacs... - Eaux de mer et eaux littorales pour le SeaVax
Spécification des déchets collectés	Tous les macrodéchets flottants (plastiques, métal, verres, organiques) Pièces entières Collecte possible des hydrocarbures liquides
Capacité de traitement	Peu d'informations <ul style="list-style-type: none"> - Recycler / Geneseas : Modèle S réservoir de 140 L ; navigation autonome jusqu'à 24 h - Iadys : Modèle 80 L ; autonomie 6 h ; modèle téléguidé - Seavax : Prototype pour la collecte de 50 t de déchets
Maturité / TRL	Globalement la commercialisation a été réussie pour les petits modèles et les modèles supérieurs sont encore en cours de développement ou de tests.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Optimise les temps et l'énergie des agents - Sensibilise les consommateurs de plastiques (lieux de collecte proche du grand public) - Permet également un suivi de la qualité de l'eau dans certains cas (Geneseas)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Bien adapté à un petit nombre d'environnement et capacité de collecte relativement faible

Cette technique de collecte semble technologiquement intensive, et encore au stade de développement. Elle ne sera donc pas incluse dans le dimensionnement technique (phase 3 de l'étude).

1.1.5. Navire

Enfin, une dernière solution de collecte mobile consiste en des bateaux de type Manta/SeaCleaner ou Plastic Odyssey (Figure 18, Tableau 7), sur lesquels peuvent être installés plusieurs systèmes de collecte (Figure 18) :

- Chaluts avec concentration des déchets devant un tapis roulant (SeaCleaners) ;
- Système d'aspiration des déchets directement sur le tapis roulant (Plastic Odyssey).

La différence avec les autres systèmes de collecte mobile réside dans l'ajout, à bord, d'étapes de prétraitement voire de valorisation en continu, qui peuvent être différentes suivant les projets :

- Modèle Manta :
 - Collecte jusqu'à 20 000 t/an de déchets via des chaluts en fonctionnement continu. Or fonctionnement lors de plusieurs sorties en mer sur l'année, donc une capacité plutôt de l'ordre de 5 à 10 000 t/an

- Tri manuel par nature et séparation du verre, du métal et des organiques (remis à l'eau)
- Broyage et compactage des plastiques pour valorisation dans une pyrolyse pour la production d'électricité (pyrolyse 5-10 000 t/an)
- Présence de petits bateaux annexes pour la collecte en zones peu profondes ou peu accessibles (via des chaluts également)

→ Plastic Odyssey :

- Capteur d'identification des plastiques par spectroscopie proche IR (identification des familles de polymère PET, PE, PP, PVC, PS)
- Un bac de lavage / séchage
- Un broyeur
- Un compacteur
- Une extrudeuse (2m)
- Une presse
- Une pyrolyse (30-40 L/h de carburant – 30-40 kg/h de plastiques soit 300 t/an)
- Une zone de stockage pour les plastiques qui seront ramenés à terre pour être ajoutés aux filières de traitement classiques (bouteilles PET par exemple)



Figure 18 : Navires de collecte et valorisation / traitement ; Manta de the Seacleaners (gauche) et Plastic Odyssey (droite)

Même si ces solutions semblent attractives, le coût de collecte lié à ce type de projets par tonne de déchets traité est difficile à évaluer puisqu'ils regroupent toutes les étapes de valorisation, ainsi que d'autres fonctions comme des espaces de sensibilisation par exemple. A noter que leur efficacité de collecte semble plus faible que celle de navires dédiés faisant des allers-retours fréquents à terre pour décharger les déchets. En effet le coût est probablement alourdi par un certain nombre de facteurs :

- La multifonctionnalité des projets : sensibilisation, collecte, traitement
- L'intensité technologique déployée

A titre indicatif le Manta de the SeaCleaner a nécessité un investissement de 30 millions d'euros²¹.

Ces installations sont des installations de type « proof of concept » qui n'ont pas vocation à un usage intensif. D'un point de vue environnemental, la conception de ces navires a été pensée pour réduire les nuisances pour la faune et la flore marine (systèmes d'éloignement des animaux marins, tri manuel des déchets avec remise à l'eau de la biomasse végétale ou animale collectée, minimisation de l'ancrage et étapes dans des ports pour limiter l'impact sur les fonds marins). De plus, pour certains, la propulsion a été conçue de manière à pouvoir être alimentée par le traitement des déchets (gaz et production électrique pour le Manta et production de diesel pour Plastic Odyssey). Néanmoins, la question des rejets gazeux via les technologies mise en œuvre (pyrolyse ou gazéification) est essentielle et il sera important de valider l'adéquation entre la conception des équipements de traitement des gaz produits avec les concentrations en polluants réellement en jeu. En effet, les procédés de traitement sont généralement dimensionnés sur une composition de gaz constante qui dépend de la composition des intrants. Or, puisque le système fonctionne en continu au fur et à mesure de la collecte, il peut être difficile de maîtriser la composition entrante et donc la production des polluants dans le gaz.

Ce point d'attention ne pourra être levé qu'après retour d'expérience et aucune conclusion ne peut être établie à ce stade puisque les deux navires ne sont pas encore en circulation.

D'un point de vue technique enfin, ce type de navire permet la collecte uniquement dans des zones où il est aisé de circuler et n'est efficace que dans des zones de forte accumulation de plastiques (estuaires par exemple).

Ce type de collecte et unité de traitement ne sera pas intégré au dimensionnement technique (phase 3 de cette étude) pour cause de manque d'information (capacité, coût).

²¹Aurélie Delmas, Libération, 2018, Yvan Bourgnon : « Au large, le Manta pourra ramasser 600 m3 de déchets plastiques »

Tableau 7 : Caractéristiques techniques de la collecte par navires

Caractéristiques techniques – Navires	
Compartment environnemental visé	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux de mer - Eaux littorales - Fleuves
Spécification des déchets collectés	Tous les macrodéchets flottants (plastiques, métal, verres, organiques) Pièces entières
Capacité de traitement	3t/h pour 70 m d'envergure de chalut (Manta)
Maturité / TRL	Les expéditions n'ont pas démarré mais les équipements (chalut, extrudeuse, pyrolyse par exemple pour Plastic Odyssey) ont été testés séparément sur plusieurs mois
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Collecte des plastiques difficilement atteignables (pleine mer) - Grande capacité de collecte
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Embarcation de taille importante si collecte et traitement d'une grande quantité de déchets

1.2. Collecte statique

1.2.1. Barrages

En parallèles des méthodes de collecte mobile, des dispositifs de collecte statique ont été développés (Tableau 8). Ils consistent pour la plupart à insérer dans un courant d'eau un élément perturbateur de la course des déchets. Les déchets via ce dispositif sont redirigés vers le bord de l'eau pour faciliter la collecte par les opérateurs, voire concentré devant un collecteur continu de type tapis roulant.

L'élément de collecte des déchets est dans la majorité des cas un boudin flottant à la surface du cours d'eau (Ocean Cleanup, Plastic Vortex, M. Trash Wheel ou SEADS - Figure 19). Une des technologies repose sur la mise en place d'un rideau de bulle à la place du boudin (Probul), créé par un tuyau transportant de l'air comprimé disposé dans le fond du milieu aquatique.



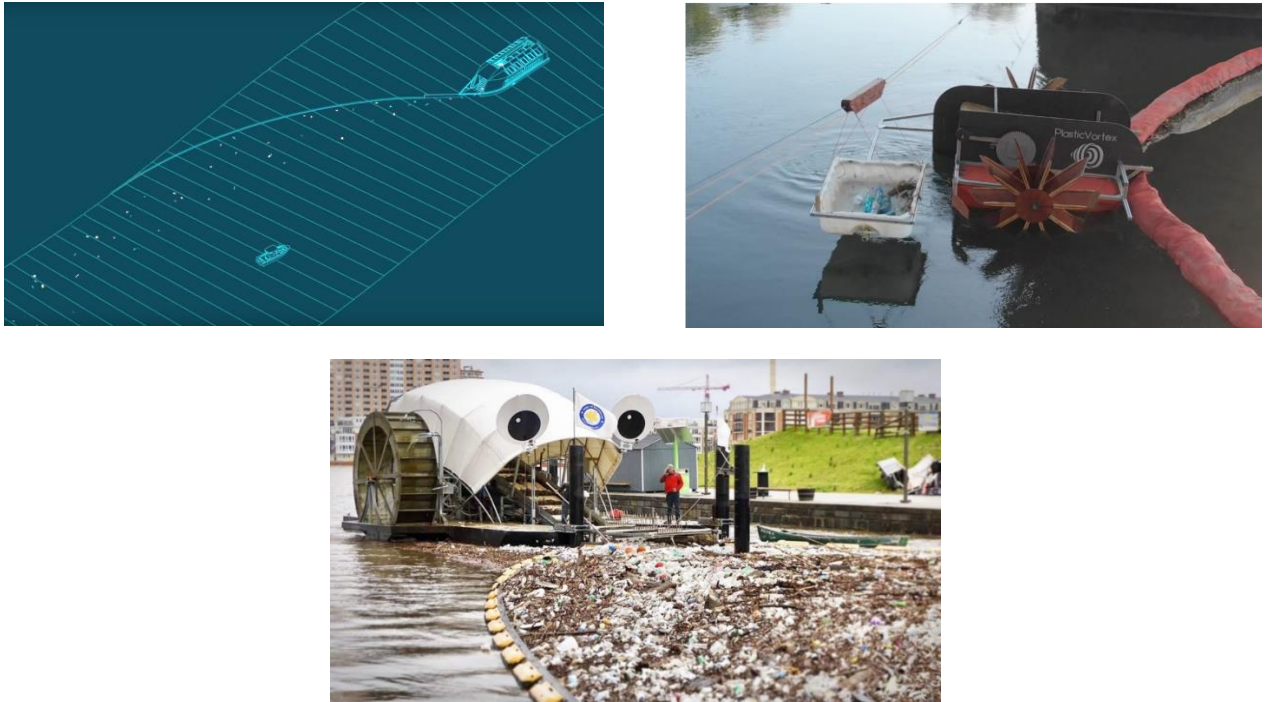


Figure 19 : Collecte par barrages flottants ; SEADS (haut gauche), Probul (haut droite), Ocean CleanUp (milieu gauche), Plastic Vortex (milieu droite) et M. Trash Wheel (bas)

En termes de capacité de collecte, celle-ci varie suivant la taille du barrage, le débit du cours d'eau ainsi que sa charge en déchet. Les informations disponibles sont les suivantes :

- Plastic Vortex 1,5t/an, stade pilote
- M. Trash Wheel environ 250 t/an (données de collecte disponibles publiquement), commercialisation réussie
- Ocean Cleanup 100 t/jour soit 30 000 t/an, stade pilote

NOTE – Ce type d'équipement de collecte est fonctionnel en cas de fonctionnement normal mais se révèle inefficace en cas de fortes pluies lors desquelles ils débordent. Les déchets sont alors relâchés.

En ce qui concerne le coût de ce type d'installation, il varie suivant les mêmes critères sur une gamme très large²² :

- M. Trash Wheel, investissement de 735 000 € et coûts de fonctionnement annuel de 130 000 € (mise en œuvre, maintenance, collecte des déchets et transport vers les unités de traitement, main d'œuvre)
- Ocean Cleanup, investissement de 1 100 000 € pour 100m (10 km de barrage prévus) et 1 700 000 € de coût de fonctionnement annuel (mise en œuvre, maintenance, aller-retours des bateaux collecteurs depuis le barrage en pleine mer jusqu'à terre)

²² <https://theliquidgrid.com/2018/03/06/part-two-tech-solutions-ocean-plastic-pollution/>

En ce qui concerne les impacts environnementaux, ils dépendent également des facteurs mentionnés, ainsi que de la méthode d'alimentation en énergie (solaire, hydraulique, électrique conventionnel, carburants liquides pour les bateaux...). Un autre point qui mérite également d'être soulevé concerne l'impact du barrage sur la faune et la flore :

- Dans le cas d'un cours d'eau, le barrage crée-t-il une discontinuité écologique ? La rétention de la biomasse animale ou végétale entraîne-t-elle la dénaturation du milieu en aval ?
- Dans le cas d'une utilisation en pleine mer, le barrage constitue-t-il un piège pour la faune ?

Il semble qu'il subsiste un manque de retour d'expérience ou d'étude sur ces sujets qui mériteraient d'être approfondis.

Tableau 8 : Caractéristiques technique des barrages flottants

Caractéristiques techniques – Barrages flottants	
Compartment environnemental visé	<ul style="list-style-type: none"> - Fleuves / Rivières - Ports - Estuaires
Spécification des déchets collectés	Tous les macrodéchets flottants (plastiques, métal, verres, organiques) Pièces entières
Capacité de traitement	<ul style="list-style-type: none"> - 1,5 t/an (Plastic Vortex) à 100 t/jour (Ocean Cleanup) - Etat de pilotes pour plastic Vortex et SEADS - Commercialisation réussie pour M. Trash Wheel (250 t/an/module)
Maturité / TRL	Différente selon les fournisseurs M. TrashWheel utilisé depuis 2014, retour d'expérience conséquent
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de maintenance - Pas d'impact sur la navigabilité - Résistant à toutes les conditions météorologiques - Efficacité proche de 100 % hors crues - Sensibilise les consommateurs de plastiques (lieux de collecte proche du grand public)
Inconvénients	- Inefficace en cas de fortes pluies / crues

1.2.2. Poubelle immergée type Seabin

Un autre dispositif de collecte statique a également été développé sous la forme d'une poubelle immergée, Seabin (Figure 20, Tableau 9). Cette poubelle fonctionne en aspirant l'eau via une pompe en continu. Le système permet la collecte aussi bien des macros que des micros-déchets (à partir de 2 mm). La vidange est manuelle et doit être réalisée régulièrement par un opérateur. La pompe (500 W) peut être alimentée par de l'énergie solaire, éolienne ou hydro. Le coût d'investissement d'une Seabin est d'environ 3 300 € et son coût de fonctionnement annuel de 1 000 €.







Figure 20 : Poubelle immergée Seabin

Tableau 9 : Caractéristiques techniques des poubelles immergées

Caractéristiques techniques – Poubelles immergées	
Compartment environnemental visé	- Ports, marinas
Spécification des déchets collectés	Tous les déchets flottants macro et micro (plastiques, métal, verres, organiques) – à partir de 2 mm Pièces entières
Capacité de traitement	Pas d'informations
Maturité / TRL	Commercialisation réussie Maturité industrielle
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement continu - Optimise les temps et l'énergie des agents - Sensibilise les consommateurs de plastiques (lieux de collecte proche du grand public)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Très petite capacité - Zone de couverture faible (marinas, ports...)











1.3. Fiches techniques – comparaison technico-économique et environnementale

	Collecte manuelle	Collecte mécanique	Filets collecteurs / Chaluts / Navires	Barrages flottants	Poubelles immergées
	Interface terre-mer	Interface terre-mer	- Eaux de mer - Eaux littorales - Eaux de transition - Lacs, rivières, fleuves	- Fleuves / Rivières - Ports - Estuaires	- Ports, marinas
	Plastiques uniquement Toutes tailles Souillés (sable, terre, algues...) Triés par résine / familles de plastiques	Tous les déchets (biomasse, verre, métal etc.) – 80 % plastique dans la fraction déchets ; Fraction déchets entre 20 et 50 % et fraction biomasse entre 50 et 80 % sur l'ensemble de ce qui est collecté Toutes tailles (dépend de la taille du chalut) Souillés (sable, terre, algues...)			
	200 kg / pers / jour Soit env. 50 t / an / pers	Dépend de la capacité de l'engin / du nombre d'allers-retours au point de collecte / du temps de fonctionnement journalier	Dépend de la taille du chalut / de la capacité des navires / du nombre d'allers-retours à quai / du temps de fonctionnement journalier (barges + bennes, petit ou grand chalut, BPH...)	0,5 – 100 t/jour 160 – 33 000 t/an Dépend de la taille du cours d'eau, de la concentration de déchets, de la taille du barrage...	0,5 t/an
	- Limite l'impact des nettoyages sur la faune et la flore locales et sur l'espace naturel	- Perturbation du milieu naturel (dégradation de la structure du sol) et donc l'érosion et la perte d'éléments nutritifs pour l'écosystème - Destruction des plantes, des animaux, de leur habitat	Peu / pas d'information disponible	- Intensité technologique (PV) qui pose la question de la déplétion des ressources (minérales) - Peu de données sur les aspects continuité écologique / rétention de la biomasse	Intensité technologique (PV) qui pose la question de la déplétion des ressources (minérales)
	Quasi nulles (sauf si prise en compte du déplacement des personnes jusqu'au lieu de collecte, si bénévoles)	Emissions liées à l'utilisation des tracteurs et des machines et du nombre d'allers-retour aux points de	Emissions liées à l'utilisation des bateaux, nombre d'allers-retours à quai notamment (nulle si	Généralement alimenté en électricité par du PV donc émissions quasi nulles	Généralement alimenté en électricité par du PV donc émissions quasi nulles

		collecte	mutualisation avec d'autres activités)		
	-	CAPEX : 400 €/tpa - tout type engin confondu	CAPEX : 2 000 €/tpa (M. Trashwheel) à 28 000 €/tpa (Ocean Cleanup)	CAPEX : 8 100 €/tpa (Seabin)	-
	OPEX : 0 à 400-500 €/tpa (bénévoles ou salariés en continu) *	OPEX : 60-70 €/tpa (maintenance, main d'œuvre et carburant) - tout type navire confondu	OPEX : 600 €/tpa (M.Trash Wheel) à 10 000 €/t (Ocean Cleanup)	OPEX : 1 600 €/tpa	OPEX : 0 à 400-500 €/tpa (bénévoles ou salariés en continu) *
	<ul style="list-style-type: none"> -Raisonne la collecte (intervention lors de besoins réels) - Faible impact environnemental - Limite la quantité de souillure collectée - Collecte sélective - Image de marque - Sensibilisation des usagers - Favorise l'emploi, l'insertion professionnelle, la formation 	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de l'intervention - Faible temps de travail - Plage propre et nette - Nettoyage rapide des plages en cas d'échouage massif 	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de collecte - Filets et chalut adaptable sur un grand nombre de bateaux et pour plusieurs compartiments environnementaux - Possibilité de se greffer à d'autres activités (pêche) pour mutualiser le matériel - Collecte des plastiques difficilement atteignables (pleine mer) 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de maintenance - Peu / Pas d'impact sur la navigabilité - Efficacité proche de 100 % - Sensibilisation des usagers - Coût main d'œuvre réduit (collecte automatisée) 	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement continu - Coût main d'œuvre réduit (collecte automatisée) - Sensibilisation des usagers
	<ul style="list-style-type: none"> - Organisation lourde - Nécessite une importante main d'œuvre disponible et formée - Acceptabilité sociale faible (retour terrain Antilles) - Pénibilité - Difficulté d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> - Collecte non sélective - Impact environnemental - Volumes importants de mise en décharge (galets, sable, coquillages, algues) - Matériel puissant / coût (tracteur, remorque, 	<ul style="list-style-type: none"> - Collecte non sélective - Matériel puissant / coût (tracteur, remorque, machine) 	<ul style="list-style-type: none"> - Collecte non sélective - Sensible aux grandes crues (inefficace) – remise en circulation des déchets 	<ul style="list-style-type: none"> - Collecte non sélective - Très petite capacité - Zone de couverture faible (marinas, ports...) - Technologiquement intensif

		machine)			
--	--	----------	--	--	--

Tableau 10 : Légende pour la lecture des tableaux de comparaisons des technologies

	Compartiment environnemental visé		Spécifications disponibles sur les intrants
	Spécifications disponibles sur les déchets (composition, taille, humidité, taux de souillures etc.)		Spécifications disponibles sur les sortants ou produits
	Capacité de traitement (pour les technologies pouvant être adaptées à une large plage de capacité, la capacité minimale est indiquée)		Coûts : CAPEX (investissements) en première ligne et OPEX (charges annuelles) en deuxième ligne
	Focus sur les données disponibles en termes d'émissions de CO ₂ et donc d'impact sur le changement climatique (pollution à l'échelle mondiale)		Données disponibles sur les impacts environnementaux en général (toutes les classes d'impacts au sens ACV – Acidification, eutrophisation, émissions de particules, déplétion des ressources, etc.) – pollutions plus localisées
	Synthèse des avantages		Synthèse des inconvénients

2. Le tri et le nettoyage

Suivant la technique de collecte retenue, les déchets collectés répondent à des spécifications différentes en termes de composition (en mélange ou non à de la biomasse), taux d'humidité, ou contenu en inertes (sel, sable etc.). Il convient alors 'adapter la chaîne de tri et de nettoyage en conséquence mais également en fonction des technologies avals retenues.

Pour le tri, plusieurs caractéristiques de la matière peuvent alors être exploitées :

- La densité
- Les propriétés magnétiques
- Les propriétés électrostatiques
- Les propriétés spectroscopiques (UV visibles, IR ou RX)

2.1. Nettoyage

Le nettoyage des plastiques est généralement réalisé sur des plastiques broyés puis immergés dans un volume d'eau pendant un temps déterminé (Tableau 11). Une étape de centrifugation permet ensuite de séparer les éléments indésirables :

- Filtration ;
- Centrifugeuse horizontale par exemple, dans laquelle la friction du produit avec lui-même élimine les impuretés ;
- Centrifugeuse verticale à couteaux dont le frottement permet également d'éliminer les résidus.

Le rinçage à l'eau permet d'éliminer les traces visibles à l'œil nu, ainsi que les contaminants solubles dans l'eau. Il est possible d'utiliser des solvants pour éliminer d'autres composés (huile par exemple).

Tableau 11 : Caractéristiques techniques du nettoyage

Caractéristiques techniques – Nettoyage	
Spécifications intrants	Tout type de résine, broyées pour augmenter l'efficacité
Débouchés à petite échelle	Lavage à l'eau : matières lavées des traces visibles et principaux produits solubles dans l'eau Lavage dans des solvants : matière lavée d'autres composés solubles
Capacité de traitement	Très variable
Maturité / TRL	Commercial (centrifugeuses)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de mise en œuvre - Efficacité
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Effluents liquides potentiellement à traiter - Elimination difficile des particules et résidus (pigments, colles) ou utilisation de solvants

2.2. Tri manuel

Il s'agit tout simplement de faire passer les déchets plastiques sur des tapis roulants de manière que des opérateurs puissent y récupérer les déchets qui sont recyclables. Ce tri permet d'intervenir en amont d'un grand nombre d'opération de tri des déchets. Il est possible d'automatiser certaines opérations (déferraillage par exemple).

Le tri manuel (Tableau 12) peut s'adresser à des pièces entières comme à du plastique broyé, bien qu'il soit plus aisé pour les personnes effectuant le tri de séparer des pièces entières. Tout type de résine peut être séparé, mais le tri est tout de même facilité et donc plus efficient lorsqu'une résine en particulier est présente majoritairement dans le mélange ou ciblée pour la séparation. En sortie de tri, on retrouve les pièces entières ou le broyat (suivant l'intrant) et les matières sont triées par résine avec un taux de pureté qui peut atteindre 95-99%. Ce tri permet également de séparer l'intrant suivant d'autres critères comme la taille ou le niveau de propreté, ce qui peut être pertinent dans le cas du plastique flottant. **Enfin, un avantage majeur de cette technique est de pouvoir être appliquée sur des plastiques en mélange avec d'autres déchets (verre, métal, biomasse), ce qui est particulièrement pertinent dans le cadre de cette étude.**

Le tri manuel est simple à mettre en œuvre en termes de technicité et d'équipements. Il peut se faire à très petite échelle de manière informelle ou à échelle industrielle (utilisé pour le tri des déchets ménagers de grandes agglomérations par exemple). En revanche, comme pour la collecte manuelle, des spécificités territoriales sont à prendre en compte pour la mobilisation de la main d'œuvre. De plus un verrou réside également dans la difficulté à séparer les pièces trop petites (morceaux fins).

Concernant la capacité de tri, celle-ci varie en fonction des moyens mis en œuvre, de la complexité du gisement à trier, des différents produits / résines à séparer du flux principal, de l'échelle de mise en œuvre, du niveau d'automatisation (tapis roulants ou non) et de l'expérience du personnel. Il est estimé qu'une personne peut trier entre 350 et 900 t/an de déchets.

Cette capacité de traitement impacte directement le coût de cette étape, et on estime le coût entre 30 et 60 €/t de déchets (main d'œuvre et électricité). La catégorie de main d'œuvre retenue influe sur le coût : certains projets sont réalisés avec l'aide de bénévoles par exemple ou bien via des structures de réinsertion professionnelles. Le coût des équipements est également à ajouter et ceux-ci peuvent prendre la forme de bac ou sacs de tri dans les contextes les plus informels à des tapis roulants et chariots de transport dans les contextes les plus industrialisés.

Tableau 12 : Caractéristiques techniques du tri manuel

Caractéristiques techniques – Tri manuel	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Pièces entières - Tout type de résine, tri facilité s'il s'agit d'une résine principale en mélange d'autres résines
Débouchés à petite échelle	<ul style="list-style-type: none"> - Pièces entières - Matières triées par type de produits, type de résine, taille, niveau de propreté etc. - Pureté 95-99%
Capacité de traitement	350 à 900 t/pers/an
Maturité / TRL	Maturité industrielle
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de mise en œuvre - Création d'emploi
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Critères simples de séparation - Coût de main d'œuvre (non qualifiée) - Conditions de travail difficile (position, odeurs)

2.3. Tri optique

Le tri optique (Tableau 13) repose sur le principe de la spectrométrie infrarouge moyen et permet dans le cadre d'un prétraitement :

- Avant broyage, de séparer les différents plastiques : les transparents d'un côté et les opaques de l'autre, ainsi que les briques alimentaires
- Après l'étape de broyage, le tri optique peut également permettre de séparer les différentes résines de plastiques : polypropylène, le PVC ou le PET ou encore par exemple, d'effectuer une séparation par couleur

Le tri est donc adapté à tous types de résines, sur des pièces entières ou broyées. En sortie de tri les pièces ou broyats (suivant l'intrant) sont récupérées triées par résine ou couleur avec une pureté

pouvant aller jusqu'à plus de 95%²³. En revanche le taux de pureté en sortie est fortement dépendant de l'intrant : plus le mélange est diversifié et pollué et plus il sera difficile d'atteindre des taux de pureté satisfaisant. La solution sur ce type de gisement sera de multiplier les machines et/ou les passages, d'autant plus que les machines actuelles permettent au mieux de séparer le flux principal en trois, avec une répercussion sur le coût de traitement.

C'est une technologie mature, permettant une cadence de tri élevée et une analyse fine. En revanche, il est à noter que la mise en œuvre à petite échelle est complexe et peu développée. **Ainsi, cette méthode de tri est écartée de l'étude, qui se concentre sur des petits gisements assez diversifiés en composition.**

Tableau 13 : Caractéristiques techniques du tri optique

Caractéristiques techniques – Tri optique	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Tout type de résine, - Pièces entières ou broyées - Préférence pour un mélange composé d'une résine majoritaire (facilitation du tri)
Spécifications sortants	<ul style="list-style-type: none"> - Matières broyées et triées par résine ou par couleur - Grande pureté des différents flux sortant (>95% sur des mélange PE / PS / PP)²⁴
Capacité de traitement	Mise en œuvre complexe à petite échelle
Maturité / TRL	Maturité industrielle pour l'IR moyen
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Cadence de tri élevée - Analyse fine
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation d'air comprimé - Très sensible à l'état des déchets (propretés, additifs etc.)

2.4. Tri par flottaison ou tri hydraulique

Cette technique peut également servir de première étape de lavage (Tableau 14). Les déchets sont broyés à une taille inférieure à 10 mm, puis immergés dans une solution stationnaire (eau ou mélange eau et additifs) ou en mouvement. Les plastiques de plus grande densité vont couler alors que la fraction moins dense reste à la surface. Cette méthode permet de séparer des plastiques dont la différence de masse volumique est au moins de 0,2 kg/L, et/ou qui ont des propriétés hydrophiles et hydrophobes différentes. Elle est couramment utilisée pour séparer les bouteilles PET des bouchons ou encore le PE et le PP (ensemble). En effet, le PET ayant une densité supérieure à 1, il

²³

http://www.ecoemballages.fr/sites/default/files/documents/bilan_projet_plastiques_aval_nov_2014.pdf

²⁴

http://www.ecoemballages.fr/sites/default/files/documents/bilan_projet_plastiques_aval_nov_2014.pdf

aura tendance à couler au contraire du PE et du PP dont la densité est inférieure à 1 (restent en surface).

C'est une méthode de tri qui peut être utilisée seule ou en complément d'autres méthodes, suivant les flux que l'on désire isoler. La pureté des flux en sortie peut atteindre 95 à 99 % mais l'efficacité est liée à la granulométrie des solides à séparer, au degré de libération en fonction de la taille de ces solides et à leur forme, mais également à la différence de densité entre les plastiques à séparer.

Le tri par flottation est une technique mature et peut s'avérer être une méthode très simple de mise en œuvre (équipements basique et non technique comme des bacs remplis d'eau) ou très automatisée et technique (solvants, tambours rotatifs, pompage et circulation automatisée etc.). Dans ce dernier cas, une attention particulière doit être portée aux consommations d'eau ou de solvant et au traitement des effluents liquides. Enfin, à noter que cette méthode nécessite une étape de séchage en aval, et s'avère donc pertinente dans le cas où une étape de lavage à l'eau (ou autre solvant) est déjà prévue dans la chaîne de traitement.

Enfin, le coût de traitement, qui dépend également du niveau de technicité dans la mise en œuvre (low-tech ou complètement automatisée) est difficile à évaluer hors-contexte.

Tableau 14 : Caractéristiques techniques du tri par flottation

Caractéristiques techniques – Tri par flottation	
Spécifications intrants	- Tout type de résine - Déchets broyés (< 10 mm) et propres en surface
Spécifications sortants	- Matières broyées - Matières triées par résine (pureté 95 à 99,9 %)
Capacité de traitement	Assez simple de mise en œuvre, spécialement à petite échelle
Maturité / TRL	Maturité industrielle
Avantages	- Simplicité
Inconvénients	- Effluents liquides à traiter, - Utilisation de l'eau - Nécessite une étape de séchage en aval

La versatilité de la méthode en termes de complexité, pouvant être adaptée à du low-tech comme en contexte industriel, ainsi que sa maturité, en fait une méthode pertinente dans le contexte de cette étude.

2.5. Tri pneumatique

Pour améliorer la séparation des plastiques, il est possible de séparer les matières broyées en vrac à l'aide de tables densimétriques (Tableau 15). C'est une méthode dite voie sèche en comparaison au tri par flottation. Elle est réalisée par la mise en suspension de la matière dans un flux d'air, les matières étant aspirées ou soufflées en fonction de leur densité. D'autres technologies font appel par exemple à l'utilisation de tables vibrantes et inclinées, pourvue de ventilateurs qui aspirent les produits légers pour évacuer les fractions lourdes. Le tri pneumatique en voie sèche

permet de séparer des flux de résines avec une forte différence de densité, il intervient donc en complément d'autres méthodes de tri de manière à améliorer son efficacité. La pureté des flux obtenus peut atteindre 70% voire 90% dans des conditions optimales (forte différence de densité, matériaux homogènes).

C'est une méthode mature, qui permet de s'affranchir des consommations d'eau ou de solvant et de ne pas générer d'effluents liquides. Elle est également intéressante puisqu'elle permet de garder les flux secs. En revanche la consommation énergétique est importante.

Il s'avère donc que sur un flux de déchets marins, cette méthode soit peu adaptée et puisse se révéler peu sélective. Elle est donc écartée de l'étude.

Tableau 15 : Caractéristiques techniques du tri pneumatique

Caractéristiques techniques – Tri pneumatique	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Tout type de résine - Déchets broyés (< 10 mm) et propres en surface
Spécifications sortants	<ul style="list-style-type: none"> - Matières broyées - Matières triées par résine (pureté de 70 à 90%)
Capacité de traitement	Assez simple de mise en œuvre, spécialement à petite échelle
Maturité / TRL	Mature
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'effluents liquides - Pas de séchage
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation énergétique

2.6. Tri par triboélectricité

Pour les plastiques ayant des densités très proches, par exemple ceux de la famille des styrènes comme l'ABS, le PS ou le PP, il est impossible de procéder à leur séparation par flottaison ou densimétrie. Un tri triboélectrique peut être mis en place (Tableau 16). Il repose sur les propriétés de polarité des plastiques qui, en s'entrechoquant, vont se charger positivement ou négativement et se séparer après un passage dans un champ électrique. Les plastiques sont broyés (< 6 mm) puis envoyés dans un lit fluidisé pour optimiser leur séparation. Il peut concerner plusieurs résines telles que le PE, le PP, les polyamides, les polycarbonates, l'ABS ou encore le PS. Ce tri permet un rendement de séparation élevé (99% de pureté pour Skytech), avant fusion et transformation en billes.

Les paramètres influents sont la force du champ électrique, le taux d'humidité relative et l'accélération du flux d'air qui doivent être réglés de manière très précise pour garantir une bonne efficacité.

Tableau 16 : Caractéristiques techniques du tri par triboélectricité

Caractéristiques techniques – Tri par triboélectricité	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Tout type de résine ; - Matière broyée (< 6 mm)
Spécifications sortants	<ul style="list-style-type: none"> - Matières broyées et triées par résine - Pureté élevée des différentes résinées séparées (99%)
Capacité de traitement	Assez complexe de mise en œuvre
Maturité / TRL	Maturité industrielle
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne efficacité, si opéré de manière optimisée
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité très dépendante des paramètres opératoires - Paramètres opératoires très dépendants des propriétés de l'intrant

Cependant, le niveau de technicité et la complexité de mise en œuvre de cette technologie sont importants. Elle n'est donc pas pertinente dans le cadre de cette étude.

2.7. Tri chimique

Le tri chimique des différentes résines plastiques en mélange peut être réalisé par solvolysse ou dissolution sélective. Ces deux techniques peuvent également être utilisées pour le recyclage chimique et sont donc présentées en détail dans la partie suivante.

2.8. Fiches technique – comparaison technico-économique et environnementale

	Tri manuel	Tri par flottation
	- Pièces entières ou morceaux de déchets - Tout type de résine, tri facilité s'il s'agit d'un nombre limité de résines à trier	- Broyats de résine en mélange avec un résine majoritaire préférentiellement - Présence de résines avec des densités différentes (> 1 et < 1 pour séparation dans l'eau) - typiquement PET vs PP/PE/PS - Déchets broyés (< 10 mm) et propres en surface
	Pièces entières ou morceaux de déchets Matières triées par type de produits, type de résine, taille, niveau de propreté etc. Pureté des flux sortants 95-99%	Broyats < 10 mm Matières triées par résine (pureté 95 à 99,9 %) ou par famille de résine suivant les conditions opératoires
	Toute capacité, idéalement sur des petites échelles pour des raisons économiques 350- 900 t/personne/an (déchets séparés du flux principal)	Toute capacité même à très petite échelle
	Dépend du niveau d'automatisme. Si consommation électrique, impact lié au mix électrique	Dépend du niveau d'automatisme : si consommation électrique pour pompage/mélange/circulation, impact lié au mix électrique Si utilisation de solvant, impacts liés à la production et au traitement du solvant Utilisation importante d'eau
	Dépend du niveau d'automatisme. Si consommation électrique, impact lié au mix électrique	Dépend du niveau d'automatisme : si consommation électrique, impact lié au mix électrique Emissions également liées au traitement des effluents (peu chargés si séparation dans l'eau)
	Env. 30-60 €/tpa (main d'œuvre + électricité) – dépend de la complexité du flux et du nombre de résines à extraire	Dépend du niveau d'automatisme
	Facilité de mise en œuvre Favorise l'emploi, l'insertion professionnelle, la formation	Facilité de mise en œuvre Peut-être couplé avec le lavage des déchets
	Critères simples de séparation Nécessite une importante main d'œuvre disponible et formée Acceptabilité sociale faible Pénibilité (position, odeurs)	Effluents liquide à traiter : peu chargés si séparation dans l'eau, chargés si solvants Utilisation importante d'eau Si non couplé avec le lavage des déchets, nécessite une étape supplémentaire de séchage

3. Broyage et nettoyage

3.1. Criblage

Le criblage est une étape intéressante pour deux raisons :

- Il permet de séparer les déchets par taille
 - De séparer les plus gros fragments pour les éliminer ou réduire à nouveau leur taille ;
 - Séparer les plus petits fragments pour les éliminer ou les agglomérer ;
 - Classer les fragments selon leur granulométrie pour faciliter la suite du circuit.
- Il permet de retirer certains indésirables comme la terre, le sable, et autres inertes de petite taille

Le principe est le suivant : les déchets circulent à travers un tambour rotatif dont la surface est perforée avec différente taille de maille, appelée trommel. Le criblage peut être utilisé sur tout type de déchets broyés ou non, l'efficacité de la séparation est de l'ordre de 90-95 % et donc l'homogénéité est assez importante dans chacune des gammes de taille sélectionnées (99 %). Les trommels sont des équipements matures et existent pour toutes les capacités de traitement, à petite échelle sur quelques kilogrammes par heure, ou à échelle industrielle pour plusieurs tonnes par heure. Les coûts d'investissement et de fonctionnement sont donc également très variables.

L'avantage est la simplicité de mise en œuvre, la robustesse et le peu de maintenance. En revanche ce sont des équipements à surveiller du fait de leur sensibilité à l'obturation.

Dans le cadre de cette étude, c'est également une étape intéressante pour éliminer une partie du sable qui aurait éventuellement été collecté.

3.2. Nettoyage

Une fois les plastiques triés, ils sont destinés à intégrer des filières de recyclage matière. Une étape indispensable est donc de les laver. Le nettoyage des plastiques est généralement réalisé sur des plastiques broyés puis immergés dans un volume d'eau (ou autre solvant) pendant un temps déterminé. Une étape de séchage permet ensuite de séparer les éléments indésirables :

- Filtration ;
- Centrifugeuse horizontale par exemple, dans laquelle la friction du produit avec lui-même élimine les impuretés ;
- Centrifugeuse verticale à couteaux dont le frottement permet également d'éliminer les résidus ;
- Séchage thermique.

Le rinçage à l'eau permet d'éliminer les traces visibles à l'œil nu, ainsi que les contaminants solubles dans l'eau. Il est possible d'utiliser des solvants comme le méthanol pour éliminer d'autres composés comme de l'huile ou le film organique (éco-corona) par exemple. Ce type de nettoyage est

adapté à tout type de résine, en mélange ou non. C'est une méthode assez simple de mise en œuvre d'un point de vue technicité : elle peut être réalisée manuellement à petite échelle ou automatisée au besoin sur des gisements plus importants. Les coûts d'investissement ou de fonctionnement sont donc également très variables.

En revanche c'est une méthode qui nécessite de l'eau et/ou des solvants et génère des effluents qui doivent potentiellement être traités. De plus, le lavage à l'eau peut s'avérer inefficace contre certaines particules et résidus (pigments, colles).

Cette méthode semble donc pertinente dans le cadre de cette étude sur les déchets marins.

3.3. Séchage

Pour certains procédés avals (pyrolyse, gazéification, extrusion) une étape de séchage est nécessaire pour abaisser le taux d'humidité du gisement après collecte ou après lavage s'il a lieu. Deux types de séchage semblent adaptés dans le cadre de cette étude :

- Le séchage par centrifugation,
- Le séchage thermique.

Ces deux méthodes peuvent être utilisées pour une gamme de capacité très variée, sur des pièces entières comme sur du broyat, sur des résines isolées, en mélange ou en mélange avec d'autres déchets. Le taux d'humidité en entrée ne constitue pas de verrous mais conditionne la puissance de la centrifugeuse et donc le coût de fonctionnement. Il est possible d'atteindre au besoin un taux d'humidité en sortie inférieur à 1 %.







Les coûts de fonctionnement sont également impactés par la capacité, le niveau d'automatisation ou encore l'état de propreté des déchets en entrée (sable, teneurs en polluants par exemple) qui peut jouer sur la maintenance et le coût de traitement des rejets liquides. En effet la composition de ces derniers en polluants peut nécessiter un traitement dont le dimensionnement prendra en compte :

- La quantité d'effluents liquides, qui dépend de la quantité d'eau utilisée pour le lavage. La quantité d'eau utilisée par tonne de déchets traitée varie en fonction de l'intensité technologique de la solution déployée (bacs de lavage manuel ou ligne de lavage automatisée par exemple), du niveau de souillure des déchets plastiques (qui n'a pas été identifié à l'heure actuelle mais qui dépend du compartiment environnemental visé, du temps de séjour dans l'eau, de la méthode de collecte, entre autres) ;
- De la concentration en polluants transférés à l'eau lors du lavage. Cette concentration elle varie en fonction de la teneur en polluant des déchets plastiques (qui n'a pas été identifiée à l'heure actuelle) de même que la quantité d'eau utilisée lors du lavage (voir tiret précédent)

Dans la grande majorité des cas, il est raisonnable de penser qu'un traitement conventionnel des résidus liquides, tel que pratiqué dans l'industrie du recyclage des déchets plastique, sera suffisant.

Pour le séchage, la filtration suivie d'une étape de centrifugation ou de séchage thermique semblent également adaptées au contexte du projet (tonnages annuels et niveau de technicité notamment).

3.4. Fiches techniques – comparaison technico-économique et environnementale

	Broyage	Lavage	Séchage par centrifugation	Séchage thermique
	Pièces entières ou non Uniquement plastique ou mélange plastique / biomasse Pas de films, pas de rubbers, tires ou thermodurs Déchets souillés ou non (impact sur durée de vie du broyeur) Taux humidité non dimensionnant	Broyats de mélange plastiques ou mélange plastiques / biomasse Déchets souillés Taux humidité non dimensionnant	Pièces entières ou non Broyats de mélange plastiques ou mélange plastiques / biomasse Déchets lavés ou souillés Taux d'humidité non dimensionnant sauf consommation énergétique	Pièces entières ou non Broyats de mélange plastiques ou mélange plastiques / biomasse Déchets lavés ou souillés Taux d'humidité non dimensionnant sauf consommation énergétique
	Broyat de mélange plastiques ou mélange plastiques / biomasse - 0-30 mm pour une presse - 0-10 mm pour une presse, de l'injection ou de la compression - 0-7 mm pour presse, injection, compression, extrusion	Même état qu'en entrée Lavées des traces visibles et principaux produits solubles dans l'eau Taux d'humidité élevé	Même état qu'en entrée Taux d'humidité diminué à 1% voire inférieur	Même état qu'en entrée Taux d'humidité diminué à 1% voire inférieur
	Toutes gammes (jusqu'à < 1000 t/an)			
	Lié au mix électrique	Effluents aqueux chargés (sable, graisses, etc.) Concentration dépend du niveau de lavage,	Lié au mix électrique	Dépend du mode de production de la chaleur (40-80°C) Production de fumées ou vapeurs à traiter
	Liées au mix électrique	Emissions dépendent du mix électrique + Intensité liée au niveau d'automatisme	Liées au mix électrique + Intensité liée au niveau d'automatisme	Dépend du mode de production de la chaleur (40-80°C)
	Capacité Granulométrie(s) sortie Niveau d'automatisation Etat de propreté des déchets entrée (sable)	Capacité Niveau d'automatisation Etat de propreté des déchets (sable) Etat de propreté des déchets en entrée vs en sortie	Capacité Humidité entrée vs sortie Niveau d'automatisation Etat de propreté des déchets entrée (sable)	Capacité Humidité entrée vs sortie Niveau d'automatisation

4. Le recyclage mécanique

Le recyclage mécanique concerne, dans les filières actuelles françaises, 99 % du recyclage des plastiques. Le reste est recyclé par recyclage chimique.

Le recyclage mécanique des plastiques est le processus par lequel les déchets plastiques sont transformés en matières premières secondaires ou en produits sans en changer significativement la structure chimique. Ce type de recyclage peut concerner tous les thermoplastiques avec peu de perte de qualité.

4.1. Extrusion

L'extrusion permet de transformer des matières thermoplastiques, de préférences de structure amorphe et de masse molaire élevée, pour en faire des objets finis ou semi-ouvrés, en continu (Tableau 17). Les produits peuvent être des profilés rigides et souples, creux ou mous, des tubes, comme des plaques, feuilles, ou films. L'extrusion peut également être orientée vers la production de granulés et compounds qui entreront dans la production d'objets finis par d'autres méthodes (injection par exemple).

L'extrudeuse (Figure 21) est composée d'un fourreau cylindrique thermorégulé comprenant une ou deux vis. Ces vis sont alimentées par une trémie qui distribue les granulés de résine plastique. Par effet de compression, cisaillement, échauffement et transport tout au long des vis, la matière est fluidifiée et homogénéisée et peut être dirigée vers une filière qui lui donne sa forme finale (formation de film, fil, profilés...). La pièce est ensuite refroidie par circulation d'eau.

On parle d'extrusion-gonflage pour la formation de film plastique, extrusion-calandrage pour la formation de feuilles et plaques, ou encore filage pour la formation de granulés de plastique

Les paramètres influant sur le procédé et son efficacité sont :

- La longueur de la vis et son rapport longueur/ diamètre
- Sa géométrie
- Son taux de compression
- Son système d'alimentation
- Le nombre de vis
- La filière.

Ces paramètres doivent être adaptés à la résine ou au mélange de résine à extruder ainsi qu'à la forme du produit désiré.²⁵

²⁵ https://record-net.org/storage/etudes/00-0905-1A/rapport/Rapport_record00-0905_1A.pdf

En ce qui concerne le coût de cette étape de valorisation il dépend :

- De l'investissement, qui est de l'ordre de 40 € par tonne annuelle (modèle Precious Plastics, qui est un des modèles les plus low-tech du marché)
- De la consommation électrique, qui est de l'ordre de 5 kW pour une unité de traitement de 50 t/an (Precious Plastics)
- De la main d'œuvre (fonctionnement continu, non continu, bénévoles, structures de réinsertion professionnelle, opérateur qualifié etc.)

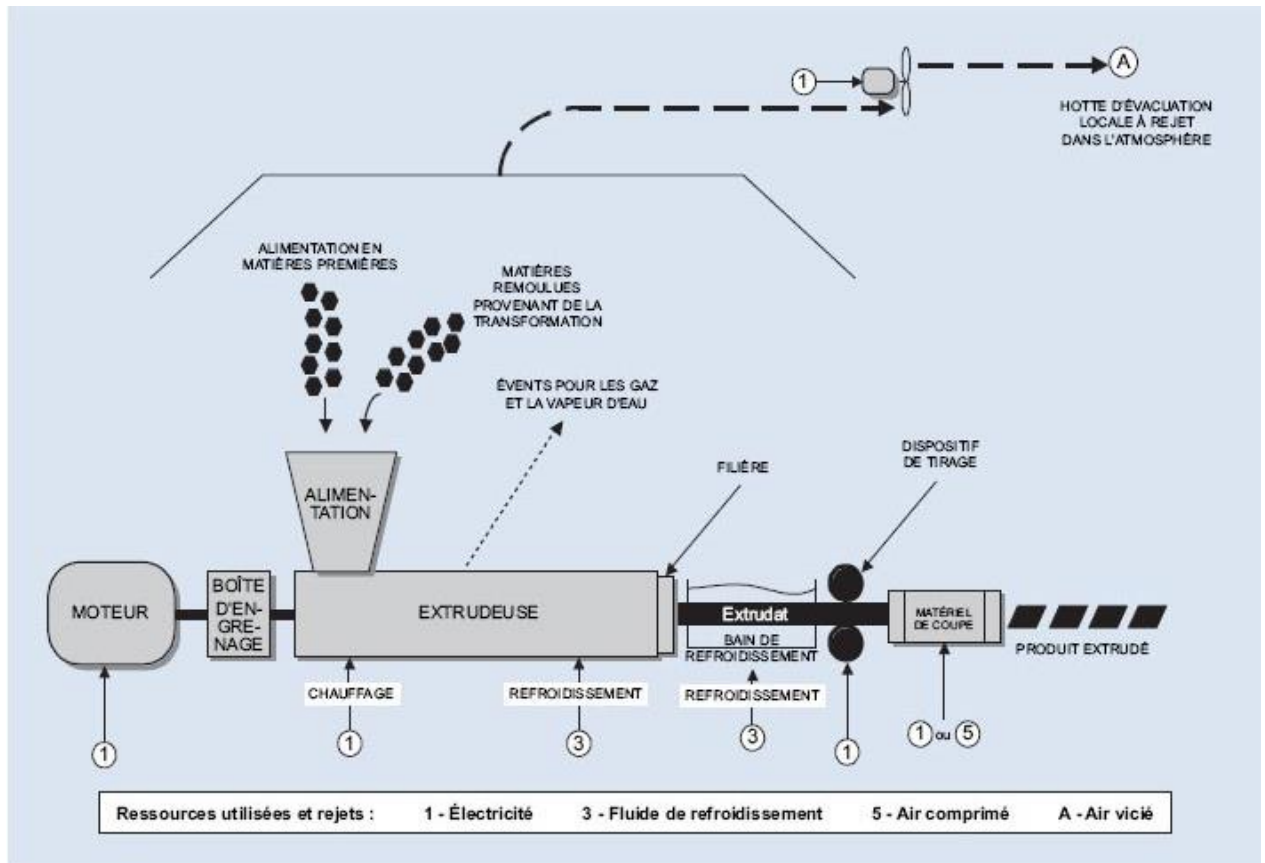


Figure 21 : Principe de l'extrusion

Tableau 17 : Caractéristiques techniques de l'extrusion

Caractéristiques techniques – Extrusion	
Spécifications intrants	PS, PVC, PET, PE ou PP isolés ou en mélange
Spécifications sortants	Production de granulés ou compounds, utilisable en injection ou en impression 3D par exemple Poutre, plaques ou autres éléments de construction Fil pour application textile Haute pureté du produit fini
Capacité de traitement	Plastic Odyssey 50 t/an
Maturité / TRL	Maturité industrielle
Avantages	- Précision de fabrication
Inconvénients	- Nécessité d'ajouter des compatibilisant si utilisation en mélange - Nécessite un taux d'humidité très faible - Nécessite une grande pureté de la matière entrante

4.2. Injection / moulage

La matière est ici fluidifiée dans une enceinte appropriée (par chauffage) puis injectée sous forte pression dans un moule. Cette technique offre une cadence de travail élevée puisque, bien que le procédé ne s'effectue pas en continu, le cycle est de quelques dizaines de secondes. La pièce est ensuite refroidie. Cette technique s'applique à des produits dont l'épaisseur de paroi est inférieure à 6 mm, puisqu'au-delà le refroidissement est trop lent pour que l'opération soit jugée économique.

L'injection se déroule en trois phases (Figure 22, Tableau 18) :

- Le remplissage par injection dans le moule, assurée par une vis piston
- Le maintien (bourrage ou compactage) durant lequel le polymère est compacté dans le moule
- Le refroidissement, suivi de l'éjection de la pièce.

Les paramètres influant sont la méthode de remplissage, qui définit l'orientation du polymère dans le moule, et de compactage du moule, qui assure que la pièce ne se rétracte pas au refroidissement.

En ce qui concerne le coût de cette étape de valorisation il dépend :

- De l'investissement qui est de l'ordre de 70 € par tonne annuelle (modèle Precious Plastics)
- De la consommation électrique, qui est de l'ordre de 15 kW pour une unité de traitement de 50 t/an (Precious Plastics)
- De la main d'œuvre (fonctionnement continu, non continu, bénévoles, structures de réinsertion professionnelle, opérateur qualifié etc.)

A noter que l'injection-moulage permet de former des pièces plastiques mais intervient nécessairement après une ou plusieurs étapes d'extrusion. On ne l'inclut donc pas dans la phase 3 de cette étude.

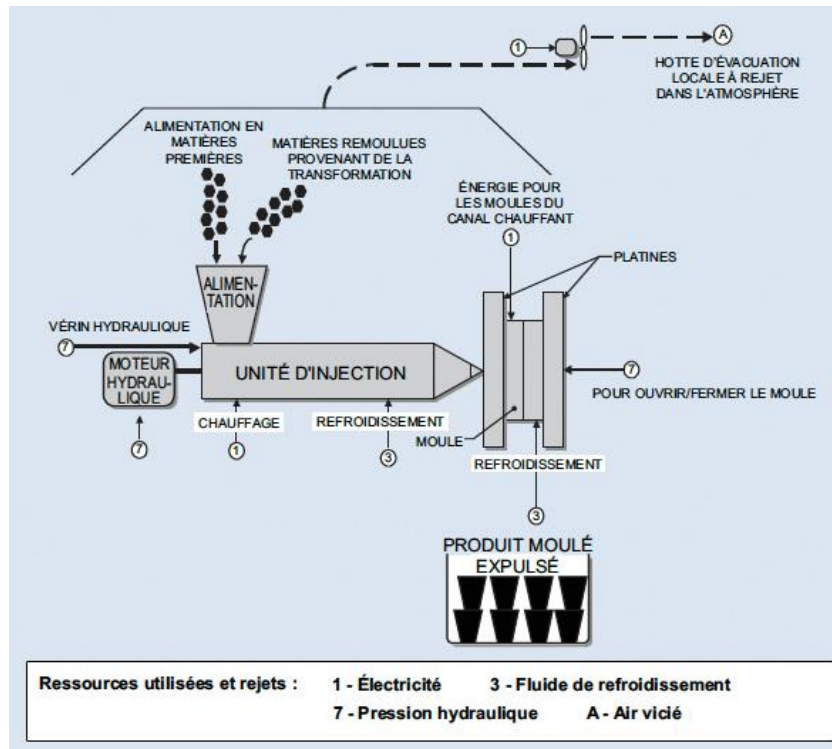









Figure 22 : Principe de l'injection

Tableau 18 : Caractéristiques techniques de l'injection moulage

Caractéristiques techniques – Injection	
Spécifications intrants	Vaste gamme de matière thermoplastique Très utilisé sur le PVC
Spécifications sortants	<ul style="list-style-type: none"> - Pièces de décoration - Mobilier urbain - Toute pièce moulée
Capacité de traitement	<ul style="list-style-type: none"> - Plastic Odyssey : 50 t/an
Maturité / TRL	Maturité industrielle
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Précision de fabrication
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Moules métalliques chers - Nécessite une grande pureté de la matière entrante - Rentabilité économique fortement dépendant du coût de fabrication des pièces, du volume de production et du marché

4.3. Fiches technique – comparaison technico-économique et environnementale

	Extrusion	Injection moulage
	PS, PVC, PE, PS, PP isolés ou en mélange PET moins conseillé du fait de la plage de température de fusion réduite Matière propre et peu dégradée Granulométrie < 10 mm Taux d'humidité < 1 %	Granulats thermoplastiques en mélanges ou monomatière Matière propre et peu dégradée Granulométrie < 10 mm Taux d'humidité < 1 %
	Granulés / poutres / fils / tubes/etc	Plaques, Pièces de diverses forme
	Toutes gammes (minimum identifié 50 t/an – Precious Plastics)	
	Emissions de CO ₂ liées au mix électrique + Intensité liée au niveau d'automatisme Emissions liées à la montée en température des matériaux, généralement aspirées par une hotte et traitée (quid du low-tech ?)	Emissions de CO ₂ liées au mix électrique + Intensité liée au niveau d'automatisme Emissions liées à la montée en température des matériaux, généralement aspirées par une hotte et traitée (quid du low-tech ?)
	40 €/tpa (pour 50 tpa)	70 €/tpa (pour 50 tpa)
	5 kW puissance électrique (pour 50 tpa) Main d'œuvre qui dépend du niveau d'automatisme et du taux d'utilisation	15 kW de puissance électrique (pour 50 tpa) Main d'œuvre qui dépend du niveau d'automatisme et du taux d'utilisation
	Permet de disposer de granulats pouvant facilement trouver un marché auprès des acteurs locaux du plastique	Permet de cibler des marchés précis et d'aller jusqu'à la production de pièces finies
	Spécifications contraignantes sur l'intrant (composition, humidité) Emissions à contrôler	Spécifications contraignantes sur l'intrant (composition, humidité)

5. Le recyclage chimique et la valorisation énergétique

Les déchets plastiques ne pouvant être recyclés mécaniquement (pour diverses raisons et notamment leur niveau de propreté ou de dégradation) sont orientés vers les solutions de recyclage chimique ou valorisés en énergie.

Le recyclage chimique comprend tous les processus permettant de reproduire du plastique mais dont les étapes passent par la modification significative de la structure chimique des polymères (monomères, molécules plateformes ou syngas).

La valorisation énergétique concerne tout procédé ne permettant pas de reformer du plastique mais bien de produire de l'énergie.

5.1. Dépolymérisation thermique

La dépolymérisation thermique (Tableau 19) consiste en la transformation de polymères (plastiques ou élastomères) en leurs monomères respectifs ou en oligomères. La dépolymérisation thermique a généralement lieu autour de 400-450 °C. Dans le cas de la dépolymérisation, aucun réactif chimique n'intervient dans la rupture des chaînes.

NOTE – La dépolymérisation thermique peut être mise en œuvre sur des polymères seuls et donne lieu à la production d'un monomère ou d'oligomères spécifiques. Elle peut également être mise en œuvre sur un mix de polymères, ce qui donne lieu à la production d'un mix de monomères et oligomères (et s'apparente à de la pyrolyse, voir paragraphes suivants). Ainsi, du fait de plages de température de mise en œuvre.

La dépolymérisation est particulièrement adaptée au traitement du PS, PMMA ou des polyamides. Cependant, cette technologie requiert un tri fin de la matière en entrée, des déchets propres et mono-résine. En sortie, il est possible d'obtenir les monomères correspondants à l'intrant avec un taux de pureté d'au moins 95 %. Des installations sont en opération sur des capacités allant de 1 000 à 15 000 t/an au stade industriel, même s'il semble que pour des raisons économiques, le haut de cette gamme soit à privilégier.

Tableau 19 : Caractéristiques techniques de la dépolymérisation thermique

Caractéristiques techniques – dépolymérisation	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Bien adaptés au traitement du PS, PMMA, polyamides - Nécessite un tri fin de la matière en entrée - Nécessite des déchets propres, mono-composition - Nécessite un prétraitement dans certains cas (déchloration par exemple)
Spécification sortants	Monomères ou mélange de monomères (> 95%)
Capacité de traitement	<ul style="list-style-type: none"> - Plage de fonctionnement optimale de 1 à 15 kt/an
Maturité / TRL	<ul style="list-style-type: none"> - Stade industriel pour plusieurs résines (polyamide, PET, PBT, PS)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Faible consommation énergétique - Meilleur rendement de conversion que la pyrolyse rapide
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'une étape de repolymérisation

Ainsi, cette technologie ne semble pas adaptée dans le cadre de la présente étude.

5.2. Dissolution sélective

Les procédés de dissolution reposent sur un principe simple : la dissolution des résines polymères dans un solvant puis récupération de ces polymères après filtration et distillation du solvant (Tableau 20). Les chaînes sont ainsi préservées et le procédé n'entraîne aucune modification chimique. C'est une méthode adaptée aux résines PSE, ABS, PC, PP, PET et multicouche.

Pour chacun des composés à récupérer, la dissolution sélective passe par plusieurs étapes :

- Broyage et lavage de la matière (< 10 mm) ;
- Dissolution d'un des composants dans un solvant adapté ;
- Filtration sous pression pour séparer la matière solide de la solution contenant la résine dissoute ;
- Récupération du composé extrait par évaporation du solvant ou précipitation (utilisation d'un second solvant) ;
- Filtration, lavage, séchage de la résine pure obtenue.

NOTE – La dissolution, si elle est sélective, est également une solution proposée pour le tri des différentes résines en mélange.

En sortie, les résines sont obtenues avec une pureté pouvant atteindre 99 %, avec une efficacité de récupération pouvant être de l'ordre de 95 %. La technologie permet donc le recyclage direct de la matière. Cependant, même si les capacités de traitement semblent adaptées au projet (500 t/an pour Polyloop) la maturité est encore faible (stade pilote), et donc les CAPEX et OPEX importants et la rentabilité économique inexistante. De plus, c'est un procédé qui n'a de sens que sur un flux très riche en une résine précise. **C'est pourquoi cette solution a été écartée de l'étude.**

Tableau 20 : Caractéristiques techniques de la dissolution sélective

Caractéristiques techniques – Dissolution sélective	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Déchets triés par résine pour optimiser le rendement économique (puisque utilisation d'un solvant par résine) - Déchets broyés (<10 mm) - Permet le traitement des résines EPS, ABS, PC, PR, PP, PET et multicouche - Particulièrement adapté au traitement du PVC
Spécifications sortants	<ul style="list-style-type: none"> - Résine polymère (99% pureté) - Efficacité de récupération env. 95%
Capacité de traitement	Polyloop en développement (500 t/an)
Maturité / TRL	Maturité pilote
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Recyclage direct - Consommation énergétique plus faible que la solvolyse
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation énergétique plus importante que le recyclage mécanique - CAPEX et OPEX élevés - Rentabilité économique difficile voire inexistante - Utilisation de solvants

5.3. Dépolymérisation chimique ou solvolyse

La solvolyse consiste en une réaction chimique d'un polymère en présence d'un solvant, conduisant théoriquement à la production des monomères de départ (Tableau 21). En pratique, on arrive souvent à des produits différents des monomères de départ. Selon le solvant utilisé on parle de glycolyse (réaction avec des diols au-dessus de 200 °C), méthanolyse (avec du méthanol), hydrolyse (avec de l'eau), aminolyse (avec des amines) et ammonolyse (avec de l'ammoniac).

Les principaux facteurs de variation des produits de sortie sont le type de réacteur, le type de solvant, le temps de réaction, la température, la pression, la présence (ou non) d'un catalyseur et le type d'atmosphère (réductrice ou oxydante). Les procédés de solvolyse peuvent être classés en deux catégories selon leur cinétique. On distingue :

- La solvolyse « douce », qui présente des temps de réaction longs et utilise souvent des solvants toxiques nécessitant un recyclage.
- La solvolyse « sous pression et en température », en particulier la solvolyse subcritique et la solvolyse supercritique, qui utilisent des solvants « durables » (eau, CO₂) avec une cinétique rapide. Dans le cas où l'on utilise le solvant « eau », la solvolyse s'apparente à un hydrocraquage.

Quelques aspects clés de la solvolyse sub- et supercritique (exemple du CO₂ - Figure 23) :

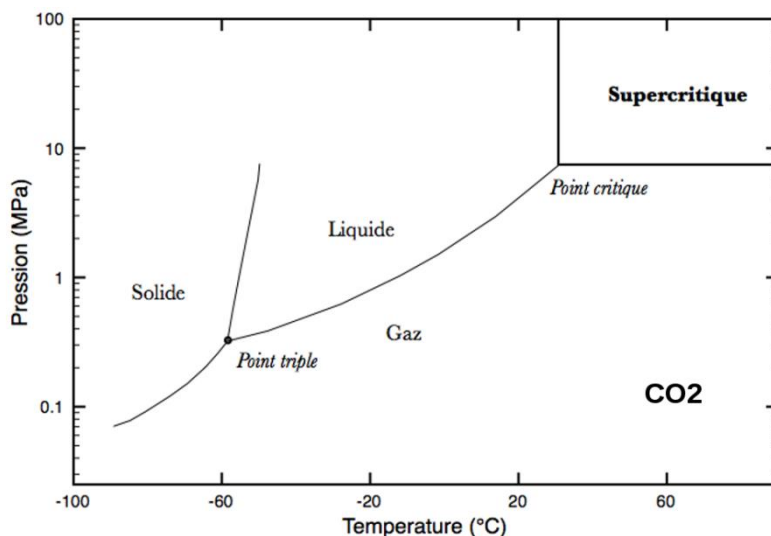


Figure 23 : Domaine sub et supercritique du CO₂

Un solvant atteint les conditions supercritiques lorsqu'il est au-dessus des conditions de pression et de température correspondant à son point critique. Le principal solvant sub- ou supercritique utilisé est l'eau. Lorsqu'elle atteint l'état sub- ou supercritique, l'eau devient progressivement apolaire. En milieu raréfié en oxygène, elle provoque une réaction d'hydrolyse des déchets plastiques, avec formation de chaînes courtes. On peut également utiliser du CO₂, certains alcools (méthanol, éthanol, isopropanol) et de l'acétone. La pression atteint 220 à 240 Bars, la température 150 à 400 °C et la durée de réaction est de l'ordre de 30 minutes (procédé batch).

Cette technologie s'adresse aux polymères de condensation (polyamides comme certains textiles ou déchets DEEE ou encore équipement automobile et polyesters. Les déchets doivent être propres et non mélangés. En sortie, sont obtenues des fibres courtes du polymère constituant l'intrant, qui seront incorporées en mélange à des fibres vierges dans de nouvelles pièces plastiques.

La maturité de cette technologie est assez faible (stade pilote) à petite échelle mais de niveau industriel à plus grande échelle. Pour les résines courantes des ordures ménagères, cette technologie est jugée non compétitive économiquement avec le recyclage mécanique. **Elle est donc écartée de cette étude.**

Tableau 21 : Caractéristiques techniques de la dépolymérisation chimique ou solvolyse

Caractéristiques techniques – solvolyse	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Déchets de polymères de condensation (polyamides comme certains textiles, déchets DEEE ou équipement automobile, et polyesters) - Déchets propres, non mélangés de préférence - Résines seules et non en mélange pour les polyamides
Spécifications sortants	<ul style="list-style-type: none"> - Fibres courtes polymères - Propriétés moins résistantes que les fibres vierge (plus courtes) et donc incorporées plutôt en mélange à des fibre vierges dans les nouvelles pièces plastiques
Capacité de traitement	Maturité pilote
Maturité / TRL	<ul style="list-style-type: none"> - Maturité industrielle pour les procédés de solvolyse douce ou sur certaines résines (nylon par exemple) - Démonstrateurs pour l'hydrolyse - Démonstrateur pour certains déchets (ex : production des bouteilles Coca-Cola à partir de déchets marin)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Procédé bien adapté au recyclage des fibres polyester (textile) - Simplicité de mise en œuvre
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Pour le polyuréthane, concurrence forte avec le recyclage mécanique - Pour les polyamides, plusieurs types souvent en mélange qui ne se dépolymérisent pas suivant le même procédé - Pour les polyesters, concurrence forte avec le recyclage mécanique pour les bouteilles PET - Non compétitive économiquement avec le recyclage mécanique pour les résines courantes des OMRs.

5.4. Pyrolyse

La **pyrolyse ou thermolyse**, également appelé carbonisation lorsque l'objectif est la production de charbon, est la décomposition par la chaleur (de 500 à 1 100 °C) d'un corps organique en absence d'oxygène (Tableau 22). On entend par "corps organique" des composés, constitués de chaînes carbonées complexes, tels les plastiques, le caoutchouc, le bois, etc. Sous l'effet de la chaleur, cette chaîne se rompt et la matière est décomposée en une fraction volatile et une fraction solide.

Les produits de la pyrolyse sont donc un solide carboné (coke), résidu de la conversion, une huile qui s'apparente à du pétrole brut (partie gaz condensable), et une fraction gaz non condensable (Figure 24). A la différence de la gazéification, la pyrolyse ne craque qu'une partie des liaisons carbone-carbone. La fraction majoritaire, l'huile, est donc un mélange de molécules de taille variable. Elle peut être valorisée énergétiquement (chaleur ou production de carburants) ou réinjectée en pétrochimie. La fraction gaz quant à elle est généralement utilisée pour fournir la chaleur nécessaire au procédé.

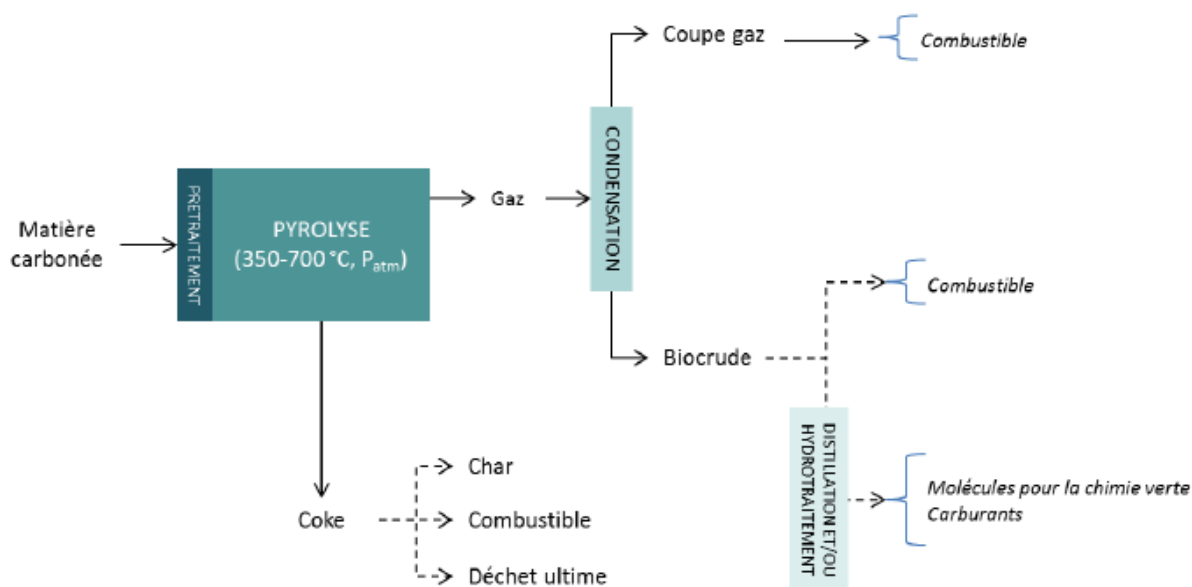


Figure 24 : procédé de pyrolyse

Le procédé a lieu en plusieurs étapes. Jusqu'à 120 °C environ, la réaction principale est le séchage de la matière, entraînant l'évaporation de l'eau. De 120 °C à 250 °C, la matière commence à se décomposer lentement jusqu'à perdre environ 10 % de sa masse sèche à 250 °C. Les produits formés sont l'acide acétique, le méthanol, l'acide formique, etc. A partir de 250 °C, le dégagement de gaz devient important et on voit apparaître :

- Les gaz combustible H_2 , CO et CH_4 ,
- Les produits condensables aromatiques.

Vers 320 °C, la quantité de gaz produit a un débit suffisant pour atteindre la limite d'inflammabilité dans l'air. En parallèle se forme le résidu solide (coke).

Les procédés de pyrolyse sont caractérisés en premier lieu selon leur vitesse de chauffe et leur température de fonctionnement. Ainsi, on distingue trois types :

- La pyrolyse lente (ou carbonisation),
- La pyrolyse rapide,
- La pyrolyse flash.

Ensuite parmi, ces trois types de pyrolyse on identifie trois modes de chauffage du produit :

- Chauffage interne classique

Dans la majorité des procédés traditionnels, l'énergie nécessaire aux réactions de pyrolyse est fournie en brûlant une partie de la charge d'intrant. Le chauffage du lit se fait par convection des produits de combustion, on parle alors de chauffage interne. L'inconvénient réside dans les faibles rendements liés à la combustion (consommation) d'une partie de la matière.

→ Chauffage externe

Dans ces procédés, l'apport de chaleur est fourni via la paroi du réacteur par une source extérieure, comme la chaleur du gaz de synthèse (recirculation extérieure). La difficulté ici est d'assurer des échanges thermiques corrects et suffisants entre l'extérieur et le cœur de la matière à pyrolyser ce qui limite ces solutions en termes de capacité.

→ Chauffage interne par média caloporteur

Ce mode de chauffage consiste à introduire en même temps que l'intrant un média caloporteur, (billes d'acier, sable, etc.) chauffé préalablement à une température contrôlée. Ce media caloporteur transfère ensuite sa chaleur à l'intérieur du réacteur au cœur de la matière à pyrolyser. Ce mode de chauffage est un bon compromis car il permet de réaliser un chauffage interne sans consommer de matière.

Il existe aujourd'hui une multitude de procédés de pyrolyse différents selon la mise en œuvre technique des réactions et selon les applications visées. Certains sont plus ou moins développés et on distingue aujourd'hui deux grandes catégories de technologies :

- Les procédés à lit convoyé ou brassé,
- Les procédés à lit fluidisé.

La pyrolyse permet de traiter toutes les résines contenues dans les déchets plastiques à l'exception du PVC et du PET. Cependant, dans le cadre d'une valorisation matière (huile pour la pétrochimie par exemple), le PE, le PS et le PP sont à privilégier puisqu'ils vont mener à la formation de chaînes carbonées et de coupes pétrochimiques intéressantes (peu de coupes lourdes), avec des rendements matières élevés (de l'ordre de 80% sur l'intrant). En sortie, suivant l'application visée et la nature de l'intrant, il est possible de produire :

- De l'huile qui s'apparente à un brut de pétrole et qui peut être utilisée comme carburant après raffinage ou dans la pétrochimie
- Une coupe préférentielle type diesel ou essence en faisant intervenir la catalyse
- Du gaz ayant un contenu énergétique intéressant, pouvant servir la production combinée de chaleur et d'électricité par exemple.

La technologie est mature (TRL 8-9), pour des gammes de capacité très variées allant du très low-tech (300 t/an en batch) à plus grande échelle (plusieurs milliers de tonnes par an).

Il semble que la présence de souillures type sable ne constitue pas une pollution chimique gênant le procédé (pour plusieurs fournisseurs de technologie). En revanche, c'est une pollution mécanique qui peut être abrasive pour les composants en mouvement (type broyeur). De plus, le sable est un composé inerte qui n'intervient pas dans la réaction et vient donc simplement grossir les flux entrant pour être récupéré en sortie de réacteur. Il entraîne donc un surdimensionnement des équipements. Suivant l'application visée, les plastiques peuvent être intégrés au réacteur en mélange avec de la biomasse déchet si les indicateurs économiques le justifient (pas de barrière technique, coût du traitement du gaz ne freinant pas la rentabilité économique).

D'un point de vue réglementaire, puisque c'est une technologie classée en tant que traitement thermique de déchets non dangereux, elle peut être soumise aux rubriques ICPE :

- 2771 (traitement thermique de Déchets Non Dangereux) – dans le cas où les déchets n'ont pas subi de préparation particulière ou que la valorisation visée n'est pas la production d'électricité
- 2971 (production d'électricité ou de chaleur à partir de Déchets Non Dangereux préparés sous forme de CSR) si les déchets passent par une plateforme de préparation (elle-même soumise aux rubriques ICPE)

D'un point de vue économique, le coût de traitement dépend :

- De l'investissement, qui est de l'ordre de 400 – 800 €/tonne annuelle (pyrolyse, traitement du gaz et moteur de cogénération)
- Des coûts opératoires de l'ordre de 60-70 €/t (main d'œuvre et maintenance).

A noter que le procédé de pyrolyse est autosuffisant en énergie lorsqu'il utilise une partie des gaz produit pour la chauffe du réacteur. L'impact environnemental est donc lié aux émissions gazeuses, qui sont généralement traitées pour correspondre au VLE (valeurs limite d'émissions) en vigueur et à l'évacuation du résidu solide (formulation de béton, bitume ou enfouissement).

NOTE - De manière à contrôler efficacement les émissions de polluants, il est nécessaire d'avoir une ration plutôt stable (avec plus ou moins quelques écarts possibles de l'ordre de +/-15 %). Ceci permet en effet de produire un gaz ayant une composition qui ne varie et de dimensionner le réacteur de pyrolyse et les équipements de traitement en conséquence. Ainsi, pour maîtriser les émissions, il est plus prudent de passer par un stockage des déchets de manière à créer un effet tampon sur la composition du gisement.

Tableau 22 : Caractéristiques techniques de la pyrolyse

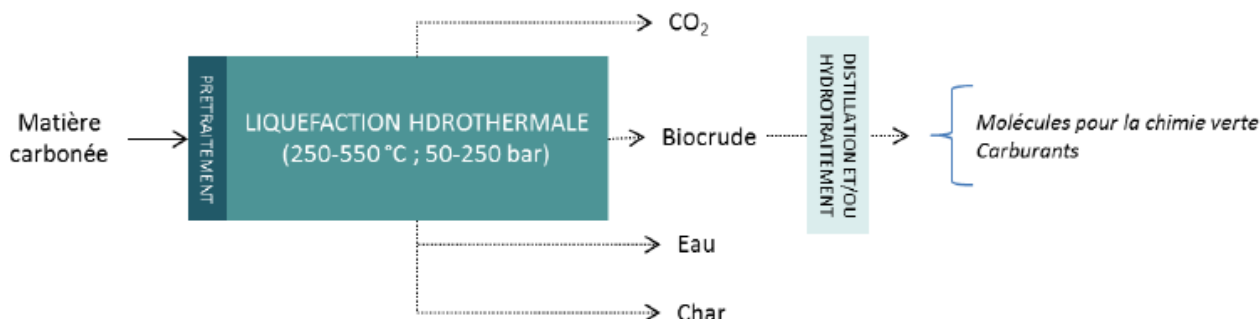
Caractéristiques techniques – pyrolyse	
Spécifications intrants	<ul style="list-style-type: none"> - Teneur en PVC et en métaux lourds à limiter - Granulométrie faible, à maîtriser
Débouchés à petite échelle	<ul style="list-style-type: none"> - Huile pour chimie - Carburant - Electricité
Capacité de traitement	À partir de 300 t/an en batch
Maturité / TRL	Maturité commerciale
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité de mise en œuvre - Multitude de débouchés en fonction du contexte / territoire - Autosuffisant en énergie
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Post traitement de l'huile à mettre en place si valorisation matière - Dans certains cas, obligation d'utilisation du carburant en mélange avec du carburant fossile - Equipement de traitement du gaz de pyrolyse à mettre en place, dont l'intensité dépend de la constance de l'intrant et de sa composition

Cette technologie semble techniquement adaptée au traitement de tout ou d'une partie du gisement plastiques marins (part non recyclable mécaniquement). Elle fera donc l'objet d'une analyse approfondie en phase 3 de ce rapport de manière à vérifier la faisabilité économique. Dans cette évaluation économique, une attention particulière sera portée au dimensionnement de la brique de traitement des rejets gazeux, de manière à être conforme aux VLE (Valeurs Limite d'Emissions). En effet, il est bien entendu que tout projet de production d'énergie à partir de déchets se doit d'être conforme à ces VLE et ne verrait pas le jour dans le cas contraire.

5.5. Liquéfaction hydrothermale

La liquéfaction hydrothermale (Tableau 23) est un procédé thermo-chimique dans lequel la matière entrante est chauffée dans une eau sous critique ($T < 374\text{ °C}$, $P > P_{\text{sat_eau}}$) et est transformée en huile (phase organique), phase aqueuse, gaz, et char (résidu solide). L'objectif de la liquéfaction hydrothermale est de favoriser la production de l'huile. Les optima de température sont généralement définis comme les températures sous lesquelles le rendement en huile est maximal. Ces températures varient d'un intrant à l'autre en raison de leur nature.

Cette huile est un mélange complexe de composés pouvant contenir des hydrocarbures, des composés aromatiques, des composés oxygénés, ainsi que des composés azotés si l'intrant de départ en contient. En parallèle de cette huile, du gaz (majoritairement du CO_2), une phase aqueuse chargée en composés organique, et un résidu solide (char) peuvent être produit.



Depuis les premières études et le développement sur la liquéfaction hydrothermale de bois, certains pilotes expérimentaux ont été développés à l'échelle du laboratoire et fonctionnent en continu, avec des capacités allant du kilogramme à la dizaine de kilogramme par heure. Le développement de la technologie s'est également accompagné d'une diversification des ressources et notamment du plastique.

On constate en effet un engouement récent pour la valorisation des plastiques par le procédé HTL à l'échelle laboratoire. Cependant, actuellement, il n'existe pas de valorisation des plastiques par

liquéfaction hydrothermale à l'échelle industrielle. Néanmoins, le passage à l'échelle du procédé de liquéfaction développé par Licella, « CAT-HTR » est actuellement annoncé pour 2025. L'installation sera capable de traiter 80 000 tonnes de plastique par an, d'origine mondiale²⁶.

La liquéfaction hydrothermale peut également se faire en conditions supercritiques afin d'optimiser les rendements en huile que l'on cherche à obtenir, que l'on peut valoriser en carburant, ou de laquelle on peut chercher à extraire les monomères résultants dans une optique de recyclage²⁷. Afin d'optimiser la production d'huile, des essais dans des réacteurs batch ont été menés, afin de connaître le potentiel de différents plastiques ainsi que les conditions opératoires optimales de transformation propres à chaque plastique. Des conditions trop douces ne permettent pas la transformation des plastiques, cependant, des conditions trop sévères (température, temps de palier) favorisent la repolymérisation des monomères produit pouvant pénaliser les rendements en huile.

La composition des plastiques joue un rôle important dans leur réactivité et plusieurs difficultés techniques limitent encore le développement de la liquéfaction hydrothermale à l'échelle industrielle :

- La limite supérieure de la concentration en matière sèche est conditionnée par la capacité des pompes existantes. Le développement de cette technologie à plus large échelle s'accompagne du développement des pompes pouvant assurer un flux continu et pressuriser les solutions sous une pression suffisante ;
- La gestion des flux sortants est importante, notamment les quantités importantes d'eau contaminée et pouvant être chargée en matière organique en sortie de réacteur ;
- La séparation de la phase aqueuse et de l'huile en sortie de réacteur en continu. A l'échelle analytique (quelques grammes de produits), l'extraction se fait à l'aide d'un solvant organique (dichlorométhane, diéthyléther, acétate d'éthyle, méthanol...), ce qui reste inenvisageable économiquement à l'échelle industrielle. La décantation peut être retenue en raison de sa facilité à mettre en œuvre pour des installations plus importantes.

L'investissement dans des infrastructures chauffées et pressurisées restent importants, et le développement de la technologie reste limitée pour des raisons économiques. A ce jour, une installation d'HTL a fonctionné en continu aux Etats Unis d'une capacité de 200 tonnes/jour pour la valorisation d'abats de dinde. Cependant, en raison de difficultés économiques, cette installation a fermé.

²⁶ Mura Technology Announce Global Licensing Partnership with KBR. *Mura Technology Limited*, 2021.

²⁷ Queiroz, A.; Pedroso, G. B.; Kuriyama, S. N.; Fidalgo-Neto, A. A. Subcritical and Supercritical Water for Chemical Recycling of Plastic Waste. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2020, 25, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100364>.

Tableau 23 : Caractéristiques techniques de la liquéfaction hydrothermale

Caractéristiques techniques – liquéfaction hydrothermale	
Spécifications intrants	- Granulométrie faible, à maîtriser
Spécifications sortants	- Huile pour chimie - Carburant
Capacité de traitement	Non
Maturité / TRL	R&D
Avantages	Produit obtenu plus propre qu'en pyrolyse
Inconvénients	Rentabilité économique inexistante

Cette technologie n'est pas assez mature (TRL < 7) et trop complexe de mise en œuvre pour être considérée dans le cadre de cette étude. De plus, la rentabilité économique n'est pas garantie à des échelles de mise en œuvre faible.

5.6. Gazéification

La gazéification (Tableau 24) est un procédé thermochimique qui converti un combustible solide (charbon, bois, paille, plastiques etc.) en un combustible gazeux et ce via l'injection en quantité réduite et contrôlée d'un agent oxydant (O_2 , air, CO_2 , vapeur d'eau...). Elle se distingue donc de la pyrolyse seule, opération thermique s'effectuant en l'absence d'agent oxydant, et de la combustion, qui s'effectue en présence abondante d'agent oxydant.

On distingue quatre grandes étapes :

- Une phase de séchage intégrée ou non au réacteur de gazéification,
- Une phase de pyrolyse qui produit, sous l'effet de la chaleur et en absence d'agent oxydant, des matières volatiles (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O_{vap} et hydrocarbures gazeux appelés « goudrons ») et du charbon essentiellement constitué de carbone fixe,
- Une phase de combustion, parfois appelée oxydation partielle, qui par injection d'un agent oxydant (air, O_2 , H_2O_{vap}) oxyde les matières volatiles produites lors de la phase de pyrolyse de façon, d'une part, à fournir la chaleur nécessaire à l'ensemble du procédé et, d'autre part, à détruire la fraction de goudrons par craquage thermique,
- Une phase de gazéification proprement dite, appelée également réduction, étroitement liée à la phase de combustion qui par des réactions thermochimiques complexes convertit le carbone fixe (charbon) en un gaz combustible riche en CO et H_2 appelé « gaz de synthèse » ou « syngas » en anglais. Des cendres généralement décarbonées et déazotées (selon le taux d'oxydation appliqué à la gazéification) sont le déchet solide ultime du procédé, représentant environ 10 % de la masse entrante (le taux de production de cendres dépend du taux de cendres des boues à l'entrée).

Ces quatre étapes sont toujours présentes mais leur déroulement et leur configuration spatiale et temporelle peuvent différer selon le mode d'introduction de l'intrant, l'agent gazéifiant et le type de gazogène. Elles peuvent avoir lieu dans un même réacteur ou dans des enceintes séparées dans le cas de la gazéification étagée.

On distingue aujourd'hui trois grandes catégories de réacteur de gazéification :

- Les réacteurs à lit fixe,
- Les réacteurs à lit fluidisé,
- Les procédés étagés (qui associent plusieurs réacteurs).

Le choix d'un type de procédé est guidé par différents paramètres tels que la consommation en combustible de l'installation (en kg/h) et donc la gamme de puissance, le combustible utilisé, l'application aval du gaz ou encore la maturité des technologies. La Figure 25 ci-dessous positionne les différentes technologies entre elles selon la consommation et la puissance thermique entrante des installations.

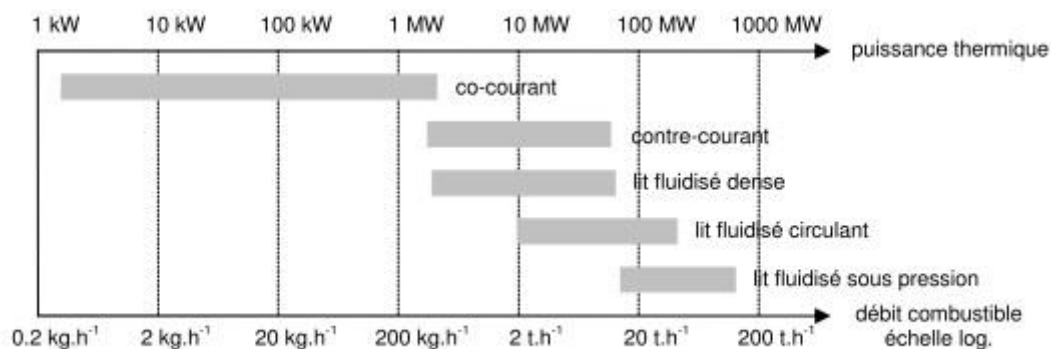


Figure 25 : Classification des technologies de gazéification en fonction de la puissance et de la capacité

Les technologies à lit fluidisé et à lit fixe contre-courant sont plutôt destinées à traiter des combustibles problématiques et ce pour des puissances importantes (plusieurs mégawatts). En revanche les lits fixes co-courant sont parfaitement adaptés à la valorisation des déchets biomasse sur site pour une production décentralisée d'électricité et de chaleur. Les procédés étagés offrent plus de flexibilité en termes d'intrants et de capacité.

Le procédé permet la conversion des déchets en gaz de synthèse, composé majoritairement d' H_2 et CO , **et en combustible solide** (sous-produit). Le gaz de synthèse est un vecteur énergétique dont la composition et le PCI varie selon le combustible, l'agent oxydant et la technologie de gazogène utilisée.

Suivant les besoins et la taille de l'unité, les applications du gaz de synthèse sont multiples :

- **Production de chaleur** (substitution d'énergie fossile en chaudière existante, etc.),
- **Cogénération** par moteur à gaz ou pile à combustible (électricité + chaleur),
- Production de biométhane de 2^{ème} génération (méthanation),
- Production d'hydrogène,
- Production de biocarburant (Synthèse Fischer Tropsch).

La gazéification est, dans la majorité des cas, une valorisation énergétique de la matière (Figure 26).

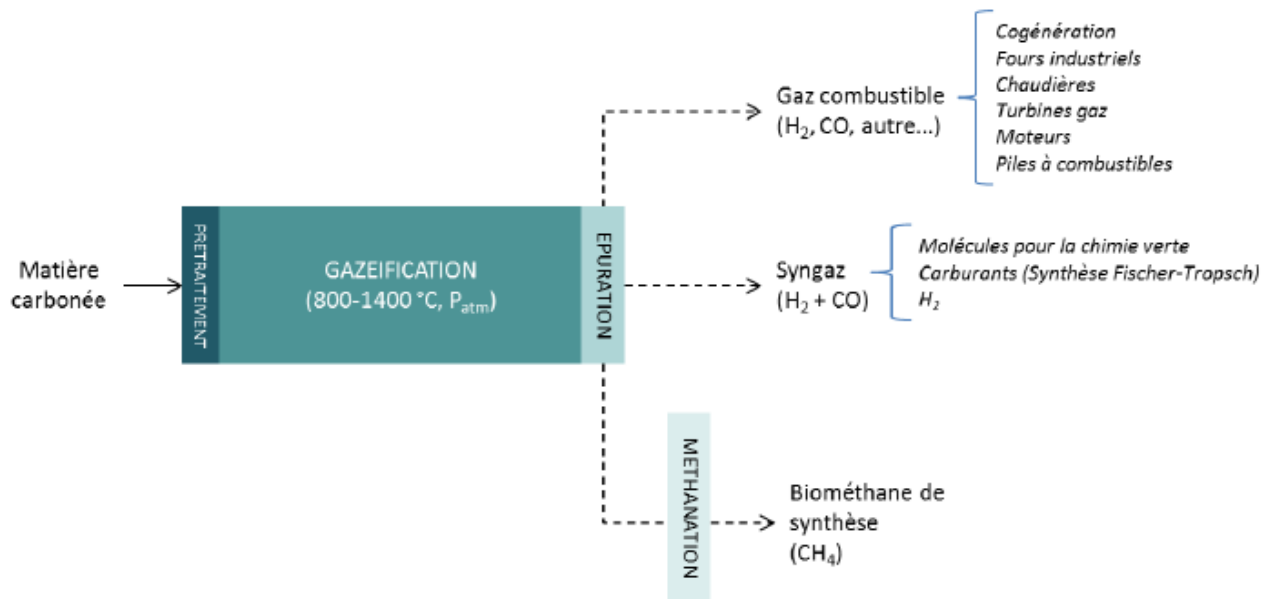


Figure 26 : procédé de gazéification

La technologie s'adresse donc à tout type d'intrant carboné avec des taux d'humidité inférieurs à 30 %, une granulométrie entre 20 et 100 mm et un taux de cendres limité. La technologie est mature sur des intrants comme le charbon, le bois ou les déchets ménagers à très grande échelle (plusieurs dizaines de milliers de tonnes par an) mais peu mature sur le plastique. De plus, les échelles de mise en œuvre sont trop éloignées du gisement concerné par cette étude.

D'un point de vue environnemental, la gazéification est autosuffisante en énergie (exothermie). L'impact environnemental est donc lié aux émissions gazeuses, qui sont généralement traitées pour correspondre au VLE (valeurs limite d'émissions) en vigueur et à l'évacuation du résidu solide (formulation de béton, bitume ou enfouissement).

D'un point de vue réglementaire, puisque c'est une technologie classée en tant que traitement thermique de déchets non dangereux, elle peut être soumise aux rubriques ICPE :






- 2771 (traitement thermique de Déchets Non Dangereux) – dans le cas où les déchets n'ont pas subi de préparation particulière.
- 2971 (production d'électricité ou de chaleur à partir de Déchets Non Dangereux préparés sous forme de CSR) si les déchets passent par une plateforme de préparation (qui sera elle-même soumise aux rubriques ICPE)

Tableau 24 : Caractéristiques techniques de la gazéification



Caractéristiques techniques – gazéification																	
Spécifications intrants	<p>Tout type d'intrant carboné, cependant pour un fonctionnement optimal, les contraintes sont parfois importantes, notamment en termes d'humidité et de granulométrie ou encore le taux de cendre et la température de fusion (influence sur le rendement et la qualité du gaz).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Technologie</th> <th>Co-Courant</th> <th>Contre-Courant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Granulométrie</td> <td>20 - 100 mm</td> <td>5 - 100 mm</td> </tr> <tr> <td>Humidité (%wb)</td> <td>< 15 – 20 %</td> <td>< 50%</td> </tr> <tr> <td>Cendres (%db)</td> <td>< 10 %</td> <td>< <u>15 %</u></td> </tr> <tr> <td>Point de fusion</td> <td>> 1 250 °C</td> <td>> 1 000 °C</td> </tr> </tbody> </table>		Technologie	Co-Courant	Contre-Courant	Granulométrie	20 - 100 mm	5 - 100 mm	Humidité (%wb)	< 15 – 20 %	< 50%	Cendres (%db)	< 10 %	< <u>15 %</u>	Point de fusion	> 1 250 °C	> 1 000 °C
Technologie	Co-Courant	Contre-Courant															
Granulométrie	20 - 100 mm	5 - 100 mm															
Humidité (%wb)	< 15 – 20 %	< 50%															
Cendres (%db)	< 10 %	< <u>15 %</u>															
Point de fusion	> 1 250 °C	> 1 000 °C															
Débouchés à petite échelle	<ul style="list-style-type: none"> - Electricité et chaleur - Chaleur - H2 mobilité 																
Capacité de traitement	Inexistante sur un mélange de plastiques. Il existe des unités fonctionnant sur du CSR ou des déchets ménagers mais à grande échelle																
Maturité / TRL	Industrielle sur CSR ou des déchets ménagers, peu mature sur du mélange plastique																
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Plutôt lits fluidisés ou entraînés pour le traitement des CSR - Autosuffisant en énergie, voire excédentaire - Voies de valorisation multiples et adaptables au contexte - Diminution du volume de matière - Emissions atmosphériques limitées 																
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un combustible sec, stable et homogène - Selon la qualité du gaz, son traitement peut générer des résidus liquides de type goudrons qu'il faudra éliminer - Sensible au point de fusibilité des cendres 																

Du fait des capacités en jeu, la gazéification n'a pas été retenue comme pertinente dans le cadre de cette étude. En revanche, dans le cas d'une mutualisation du flux de déchets plastique flottants avec d'autres déchets plastiques, déchets de biomasse, déchets de bois ou déchets ménagers (> 10 000 t/an) afin d'apporter du carbone fixe, la gazéification peut s'avérer pertinente. Il faut alors passer par une étape de préparation de CSR (Combustible Solide de Récupération) afin de préparer une ration stable (plastique, biomasse bois ou carton) pour l'alimentation du réacteur.

5.7. Fiches technique – comparaison technico-économique et environnementale

	Pyrolyse	Ligne préparation CSR pour incinération ou gazéification
	<ul style="list-style-type: none"> - Uniquement PE/PS/PP si valorisation diesel - Tous le flux de déchets (incluant biomasse) si valorisation électricité - Teneur en PET, PVC et en métaux lourds à limiter (< 5%) - Granulométrie faible, 15-150 mm - Taux d'humidité < 20-30 % (au-delà bilan énergétique non optimisé ; la chaleur de la pyrolyse permet un séchage jusqu'à 10%) - Déchets souillés ou non 	<ul style="list-style-type: none"> - Tous le flux de déchets (mix plastique / biomasse) - Granulométrie > 150 mm - Taux d'humidité ? < 20-30 % (au-delà bilan énergétique non optimisé ; la chaleur de la pyrolyse permet un séchage jusqu'à 10%) - Déchets souillés (sable) mais débarrassés des métaux et déchets fermentescibles
	<ul style="list-style-type: none"> - Huile de pyrolyse (30 wt%) - Char (35 wt%) - Gaz de pyrolyse (35 wt%) - Chaleur - Electricité + chaleur - Huile moteur - Diesel après raffinage (distillation) 	<p>CSR correspondant aux spécifications d'entrée d'unités d'incinération ou gazéification</p> <ul style="list-style-type: none"> - Incinération : production de chaleur ou d'électricité + chaleur - Gazéification : production de chaleur / d'électricité + chaleur / d'H₂ / de CH₄
	< 1 000 t/an jusqu'à plusieurs milliers de tonnes par an	<p>10 000 – 50 000 t/an (gazéification) 50 000 t/an (incinération)</p>
	<p>L'étude ACV menée par Sphera pour BASF (auditée par trois experts indépendants) conclue que la pyrolyse des déchets plastiques mélangés pour la production de naphta émet 50 % moins de CO₂ que leur incinération pour la production de chaleur et d'électricité²⁸</p> <p>Conclusions similaires pour une étude ACV du CE Delft commandée par le</p>	<p>L'étude ACV menée en interne (S3d) sur la gazéification de CSR à la Martinique pour la production d'électricité montre de meilleurs résultats environnementaux que le traitement conventionnel des déchets (13 classes d'impact sur 16)</p> <p> Contextes études et mix énergétique</p>

²⁸<https://www.basf.com/fr/fr/who-we-are/sustainability1/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling1/lca-for-chemcycling/download-study.html>



	gouvernement néerlandais sur le sujet	
	<p>La pyrolyse est moins performante que l'incinération sur les classes d'impact eutrophisation²⁹ (eau douce, marine, terrestre) et acidification³⁰. Pyrolyse plus performante que l'incinération sur la déplétion des ressources³¹.</p> <p>Ces conclusions intègrent les impacts générés par les flux entrants et sortants des systèmes étudiés (méthodologie ACV) dont les polluants contenus dans les rejets gazeux, après procédés d'abattement des polluants (normalement obligatoirement inhérent à tout projet / procédé de valorisation énergétique).</p>	
	<p>CAPEX : 400 – 800 €/tpa_MS (pyrolyse, traitement du gaz pour correspondre au VLE et moteur de cogénération)³²</p> <p>OPEX : 60-70€/tpa (main d'œuvre, maintenance, électricité)</p> <p>Note : Le traitement du gaz inclut une série de lits adsorbants (charbon actif par exemple) ou scrubbers acides et basique pour l'élimination de polluants tels que</p>	<p>Production de CSR CAPEX : 450 €/tpa OPEX : 60€/t</p> <p>Gazéification CAPEX 900-1800 €/tpa (gazéification + traitement du gaz + moteur de cogénération)</p>

²⁹ L'eutrophisation des milieux aquatiques est un déséquilibre du milieu provoqué par l'augmentation de la concentration d'azote et de phosphore dans le milieu. Elle est caractérisée par une croissance excessive des plantes et des algues due à la forte disponibilité des nutriments. Les algues qui se développent grâce à ces substances nutritives absorbent de grandes quantités d'oxygène, lorsqu'elles meurent et se décomposent. Leur prolifération provoque l'appauvrissement, puis la mort de l'écosystème aquatique présent : il ne bénéficie plus de l'oxygène nécessaire pour vivre, ce phénomène est appelé « asphyxie des écosystèmes aquatiques »

³⁰ L'acidification terrestre est l'augmentation de la quantité de substances acides dans les sols. Les pluies acides, conséquences de l'acidification atmosphérique, ont des effets nocifs sur la faune et la flore. Elles sont à l'origine du dépérissement de certaines forêts. Les pluies acides sont causées par les combustions qui produisent du dioxyde de soufre (SO₂) et des oxydes d'azote (NOx) et par l'ammoniac gazeux (NH₃). On prend aussi en compte les émissions d'acide chlorhydrique (HCl). L'acidification atmosphérique est calculée en grammes équivalent acide, que l'on note g_{éq.}H⁺. On détermine les émissions de chaque substance et on lui applique un coefficient qui représente son potentiel d'acidification.

³¹ Cet indicateur d'impacts est exprimé en kg équivalent antimoine (kg_{éq.}Sb). Il représente l'extraction de minéraux et de carburants fossiles en fonction des réserves disponibles et de leur consommation actuelle.

³² REX S3d Ingénierie basé sur de multiples consultations fournisseurs pour des projets divers

	<p>les particules, les COV, le NH₃, l'HCl ou l'H₂S communément présents dans les effluents gazeux.</p>	<p>OPEX : 50 €/t (main d'œuvre, maintenance, électricité)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - Permet la valorisation d'un mix déchets plastique large ou même d'un mix déchets plastiques / déchets biomasse (limite les étapes en amont) - Multitude de débouchés en fonction des besoins du territoire (production de chaleur, cogénération d'électricité et de chaleur, production d'huile de pyrolyse, ou encore production de diesel) 	<p>Permet la valorisation d'un mix plastique large ou même d'un mix déchets plastiques / déchets biomasse (limite les étapes en amont)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement du gaz à mettre en place - Post traitement de l'huile à mettre en place si valorisation matière - Dans certains cas, obligation d'utilisation du carburant en mélange avec du carburant fossile - Utilisation de moteurs spéciaux pour la production électrique 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite de mutualiser les flux - Nécessite un gisement conséquent (> 15 000 t pour la gazéification et > 50 000 t pour l'incinération)

6. Conclusions de la phase 2

La phase 2 permet d'identifier les technologies disponibles pour la valorisation et le traitement des déchets plastiques flottants et de mettre en avant les technologies les plus prometteuses en termes de maturité et d'échelle de mise en œuvre pour répondre aux problématiques liées aux territoires visés par l'étude :

- Quantité de déchets plastiques ;
- Composition des déchets plastiques ;
- Possibilités de débouchés pour les matières recyclées ;
- Possibilités de débouchés pour les vecteurs énergétiques produits (chaleur, électricité, carburants).

Dans le cas extrême où aucune infrastructure de valorisation ou traitement n'est présente sur le territoire considéré, un schéma de filière modèle a été dressé (Figure 27).





Après recensement des différentes technologies disponibles, un premier tri a donc été effectué sur la base de critères techniques (capacité annuelle, technicité, maturité, cohérence vis-à-vis des spécifications composition, souillures, humidité des déchets collectés) et certaines technologies semblent pertinentes dans le contexte de cette étude :

- Collecte manuelle, mécanique, par chalut, par barrages flottants ; En effet, il s'avère que toutes les techniques de collecte disponibles peuvent être envisagées et sont très complémentaires entre elles. Ainsi, il s'agit de couvrir un maximum de compartiments environnementaux (plages, berges, cours d'eau, littoral, lagunes etc.) par la diversification des moyens de collecte.
- Tri manuel ou par flottaison ; Ce sont en effet les technologies les plus low-tech disponibles, et donc adaptées à des gisements faibles (< 1 000 t/an).
- Broyage et lavage puis séchage par centrifugation ou séchage thermique ; Le broyage est une étape indispensable, que ce soit pour le recyclage mécanique ou pour la valorisation énergétique. La technique de séchage sélectionnée dépend des utilités disponibles sur site (la centrifugation requiert de l'électricité alors que le séchage thermique requiert de la chaleur par exemple).
- Recyclage mécanique par extrusion des résines seules ou en mélange pour la production de granulés ;
- Valorisation énergétique par pyrolyse ou production de CSR pour la gazéification ou l'incinération. Dans le cas où il n'y a pas d'infrastructure présentes sur le territoire, le développement d'une unité de pyrolyse à très petite échelle (exemple 300 t/an) peut être envisagée, alors que si la mutualisation avec d'autres flux terrestres est envisageable, la production de CSR pour alimenter une unité de pyrolyse, de gazéification ou d'incinération à plus grande échelle restera la solution la plus pertinente économiquement

À la suite de cette identification il semble important de ne pas favoriser ou écarter des technologies en particulier mais bien de les utiliser toutes de manière complémentaire puisqu'elles

répondent à des besoins / fonctions différentes. Cela permet de construire des filières globales au sein d'un territoire de manière à unir les efforts, maximiser l'efficacité et assurer la pérennité économique, plutôt que d'encourager des initiatives isolées qui ne sont pas coordonnées entre elles ou avec les réalités du terrain.

Tableau 25 : Légende pour la Figure 27

	Briques de collecte
	Briques recyclage matière pour la production de granulés pouvant être utilisés dans divers filières (matériaux de construction, imprimantes 3D, décoration, etc.)
	Briques de valorisation énergétique
	Briques auxiliaires

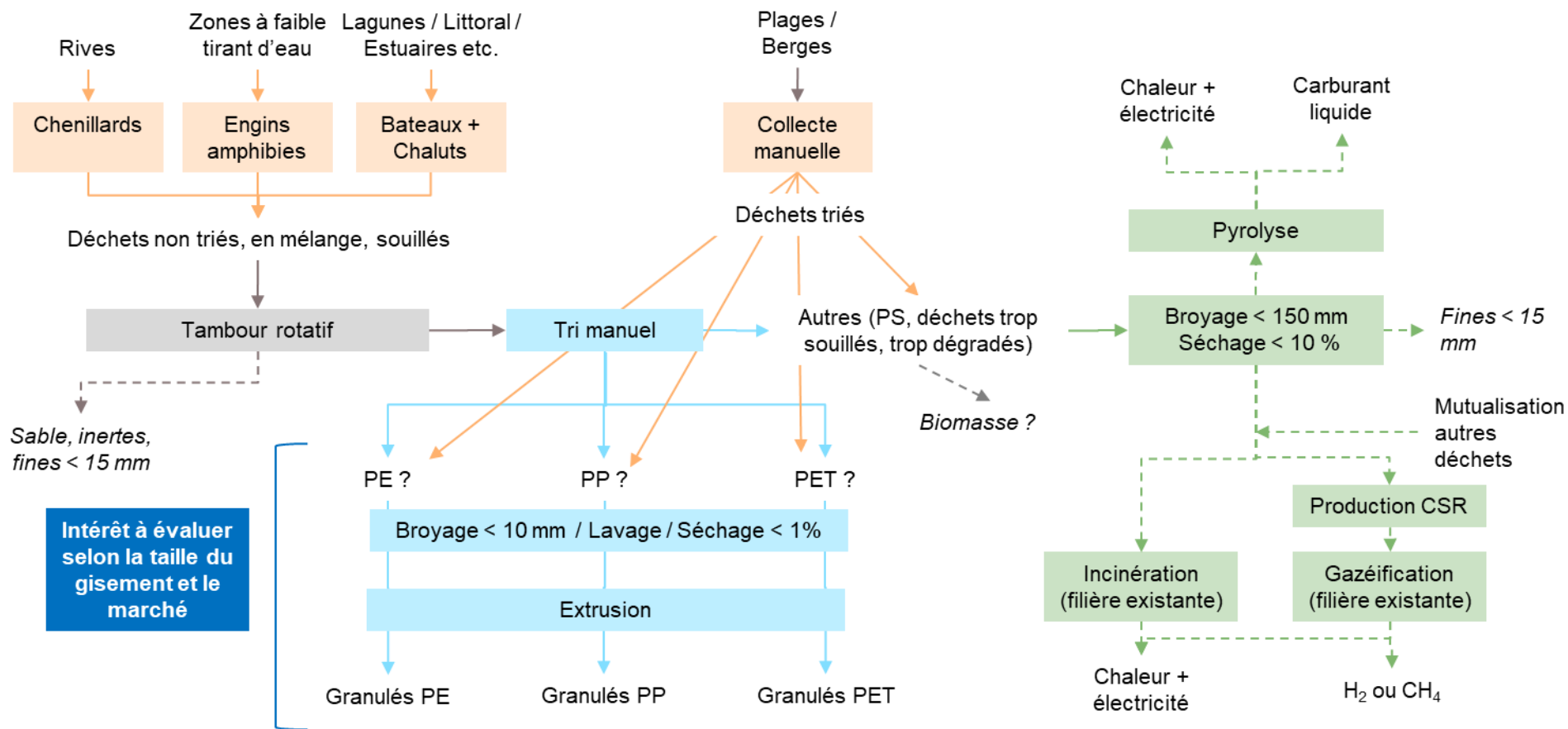


Figure 27 : Schéma de principe pour la construction des filières de valorisation des macrodéchets flottants

6.1. Collecte et tri

La collecte repose sur une utilisation combinée des différents modes de collecte disponibles :

- Pour les plages et les berges – collecte manuelle de manière à pouvoir collecter également dans les zones difficiles d'accès et à préserver l'environnement (par rapport à la collecte mécanique)
- Pour les zones à faible tirant d'eau sans courant (zones d'accumulation) – collecte par des engins amphibie, ce qui s'apparente à de la collecte mécanique sur l'eau, malgré l'impact environnemental
- Pour les zones à faible tirant d'eau avec courant – collecte via des barrages flottant
- Pour les zones types littoral, lagunes, estuaires larges – collecte par chaluts

NOTE – Pour simplifier l'étude technico-économique, la collecte sur les fonds en plongée, est jugée marginale en termes de quantité collectée, elle n'est donc pas intégrée. Néanmoins elle semble intéressante à mettre en œuvre dans le contexte ultramarin.

En ce qui concerne le tri, les quantités en jeu orientent le choix plutôt vers du tri manuel. C'est une option à faible investissement et avec un OPEX reposant essentiellement sur l'humain. De plus, le tri manuel peut, s'il est socialement accepté, peu permettre de créer des emplois non délocalisable sur des territoires à fort taux de chômage.

6.2. Recyclage mécanique

On rappelle que pour guider la construction de la filière de recyclage mécanique, il est absolument nécessaire de réaliser une campagne de caractérisation du gisement, par bassin environnemental. A ce jour, la caractérisation terrain est la seule manière de définir la composition du gisement à traiter et d'estimer les quantités mobilisables. Cette caractérisation permettra :

- Dans le cas où des filières de recyclage mécaniques sont présentes sur le territoire, d'approcher les acteurs du milieu avec des informations concrètes sur la composition et le taux de souillure des déchets, et identifier les briques de traitement à mettre en place de manière à pouvoir intégrer les flux flottants et marins aux filières existantes ;
- Dans le cas où aucune filière n'est en place, mener une étude de dimensionnement technico-économique, même grossière, pour estimer des coûts de production de granulés plastiques et déterminer quelles seront les résines qui présentent un dont le tri et le recyclage mécanique sont pertinents. Il est également crucial d'étudier les marchés de valorisation de ces granulés par territoire de manière à construire des filières pérennes.

Dans le cas du développement d'une filière de production de granulés, les déchets collectés manuellement peuvent être directement triés par matière ou non. L'ensemble des déchets collectés (manuellement ou non) sont passés dans un trommel de manière à éliminer les inertes, dont le sable, et les fines (< 15 mm).

Ils sont ensuite envoyés sur un tapis roulant de manière à être triés manuellement. Dans la mesure où une filière peut être rentabilisée par matière, seront séparés du flux principal :

- Le PET ;
- Le PP ;
- Le PE.

Suivant l'étude économique préalablement établie, ces trois types de résines seront collectés ensemble ou séparément. Chacun des flux, ou le flux unique suivant le modèle choisi, est broyé (< 10 mm), lavé à l'eau et séché (< 1% d'humidité). Il est ensuite passé dans une extrudeuse de manière à produire des granulés plastiques recyclés pouvant être revendu à des utilisateurs finaux pour diverses applications.

NOTE – lors du dimensionnement d'une filière similaire³³, des professionnels du recyclage plastique ont été consultés sur les spécifications à respecter concernant le broyat de plastique ou les granulés extrudés. Il ressort des entretiens qu'il est souvent préférable de ne réaliser que le broyage et de revendre le broyat aux recycleurs, dans la mesure où ceux-ci mettent systématiquement en place des étapes de lavage et séchage de leur propre gisement avant extrusion. La mutualisation des étapes de lavage et séchage chez les recycleurs est donc généralement économiquement plus intéressante. Néanmoins chaque contexte étant différent il convient d'adapter la construction de la filière en fonction.

6.3. Valorisation énergétique

6.3.1. *Sans mutualisation*

Dans le cas où il n'est pas possible ou pas souhaitable, au regard du contexte territorial, de mutualiser les flux de macrodéchets flottants avec d'autres flux de déchets, la solution de valorisation énergétique la plus pertinente est la pyrolyse. En effet, cette technologie permet de traiter les déchets plastiques et éventuellement les déchets biomasse résiduels, avec des contraintes de spécifications en entrée qui correspondent à priori au gisement (peu de nettoyage, broyage, tout type de résine à part le PVC et le PET, inertes non problématiques etc.). Cette technologie par ailleurs permet d'adapter la valorisation énergétique en fonction du contexte : électricité, huile carburant ou diesel.

Ainsi, tout le flux de déchets qui ne peut être valorisé en recyclage mécanique est envoyé vers une unité de broyage (< 150 mm) et de séchage (< 10 % d'humidité, alimentée par l'excédent d'énergie de la pyrolyse), puis vers l'unité de pyrolyse. En amont de l'unité de pyrolyse, il est souhaitable de mettre en place une plateforme de stockage de manière à faire tampon et permettre

³³ Etude et dimensionnement d'une filière de valorisation de macrodéchets flottants de la lagune d'Abidjan en Côte d'Ivoire réalisée par S3d Ingénierie

l'homogénéisation du gisement en composition (meilleur contrôle du procédé de pyrolyse et donc des concentrations en polluants dans les effluents gazeux).

Les gaz de pyrolyse sont en général envoyés dans un moteur de cogénération pour la production d'électricité (chauffe du réacteur et excédent) et de chaleur (séchage de l'intrant). Les off-gas de cette unité de cogénération sont traités par lits d'adsorbants de manière à respecter les VLE. Est également produite une fraction huileuse dont la valorisation dépendra du contexte et de la technologie choisie (chauffage du réacteur) – production de diesel, utilisation pour la production de chaleur et/ou d'électricité également.

En sortie également, la fraction solide qui est éliminée avec les fines issues du broyage (ciment ou enfouissement).

6.3.2. ***Avec mutualisation (autres déchets terrestres, déchets ménagers, etc.)***

Dans le cas où il est possible ou souhaitable de mutualiser le traitement des macrodéchets flottants avec d'autres flux de déchets du territoire (plastique, bois, carton) deux solutions de valorisation sont possibles :

- L'envoi des macrodéchets flottants vers les unités d'incinération existantes. Dans ce cas l'énergie produite sera de la chaleur et de l'électricité ;
- La mise en place d'une unité de production de CSR (combustibles solides de récupération) – Le gisement est ainsi stocké pour être homogénéisé en composition, puis broyé et mis sous forme de granulés. Ces granulés pourront alimenter un incinérateur (pour les gisements de grande taille – 50 000 tpa environ pour les petits incinérateurs) ou bien une unité de gazéification (plus pertinent au regard de la taille du gisement). Dans le cas de la valorisation par gazéification, l'énergie produite peut être de la chaleur, de l'électricité ou encore de l'hydrogène ou du méthane de synthèse, suivant les besoins du territoire.

Afin d'appréhender le dimensionnement technico-économique de ce type de filière, une étude de cas est présentée dans la prochaine partie de ce rapport.

Phase 3 - Etude technico-économique et environnementale de filières de traitement

1. Scénario 1 – valorisation et traitement des déchets à petit échelle

6.4. Présentation du scénario 1

6.4.1. *Gisement*

a. Composition

En première approche, il a été retenu pour ce scénario que la composition du gisement par résine plastique correspond à la caractérisation de la part des plastiques dans les déchets ménagers caractérisée dans le MODECOM 2017 décrite en première partie (Figure 14).

b. Quantification

Il a été décidé de dimensionner le scénario petite échelle sur la collecte de **500 t de déchets plastiques**. De manière à cadrer le dimensionnement technique, d'autres hypothèses ont été établies :

- La proportion de déchets collectés sur les berges et les plages est de 15%, ces déchets ont un taux d'humidité de 20% et sont collectés sans biomasse. Le taux d'inertes (sable, sel) est de 10%.
- La proportion de déchets flottants et marins (mer, cours d'eau, embouchures, littoral, lagunes etc.) est de 85%, ces déchets ont un taux d'humidité plus important que les déchets collectés sur les plages et berges, estimé à 30%, et sont collectés en mélange avec de la biomasse. La répartition déchets plastiques / biomasse est estimée à 30% / 70%. La proportion d'inertes (sel, sable) est de 10%.
- La part des résines recyclables mécaniquement (tout compartiment environnemental confondu) pouvant effectivement être envoyée en recyclage mécanique est de 85%.
 - Pour le PEHD et PEBD, 85% est envoyé en recyclage mécanique et 15% en valorisation énergétique, sous la dénomination générique PE
 - Pour le PP, 85% est envoyé en recyclage mécanique et 15% en valorisation énergétique
 - Pour le PET, 85% est envoyé en recyclage mécanique et 15% en valorisation énergétique
 - 100% des flux PS et « autres » est envoyé en valorisation énergétique
 - 100% de la biomasse collectée et remise dans l'environnement

Le Tableau 27 ci-dessus quantifie les différents flux de déchets plastique, par résine et par voie de valorisation. Ainsi, les deux flux orientés vers le recyclage mécanique et vers la valorisation énergétique peuvent être décrits comme suit (Tableau 26) :

Recyclage mécanique			
Résine			Tonnage
	<i>PEBD sec</i>	t/an	174
	<i>PEHD sec</i>	t/an	26
	<i>PP sec</i>	t/an	54
	<i>PET sec</i>	t/an	61
Humidité		%	29%
		t/an	126
Tonnage total brut		t/an	441
Valorisation énergétique			
Tonnage annuel plastique		t/an	186
Composition			Tonnage
	<i>PEBD sec</i>	16%	31
	<i>PEHD sec</i>	2%	5
	<i>PP sec</i>	5%	9
	<i>PS sec</i>	34%	63
	<i>PET sec</i>	6%	11
	<i>Autres sec</i>	36%	68
	<i>Total sec</i>	100%	
Humidité		29%	75
Tonnage total brut		t/an	261

Tableau 26 : Description quantitative des flux recyclage mécanique et flux valorisation énergétique – scénario 1

Plages, berges, interface terre-mer			Embouchures cours d'eau et flottants		
Gisement			Gisement		
Tonnage total	t/an	104	Tonnage total	t/an	2091
Composition	%	t/an	Composition	%	t/an
Humidité	20%	21	% humidité	30%	627
Sable	10%	8	% sable	10%	47
Biomasse	0%	0	% biomasse	70%	992
Tonnage plastique	t/an	75	Tonnage plastique	t/an	425
Composition résine	%	t/an	Composition	%	t/an
PEBD sec	41%	31	PEBD sec	41%	174
PEHD sec	6%	4,5	PEHD sec	6%	25,5
PP sec	12,60%	9	PP sec	13%	54
PS sec	12,60%	9	PS sec	13%	54
PET sec	14%	10,8	PET sec	14%	61,2
Autres sec	14%	10	Autres sec	14%	58
Total	100%		Total	100%	

Plages, berges, interface terre-mer			Embouchures cours d'eau et flottants		
Recyclage mécanique			Recyclage mécanique		
Taux de "refus"		15%	Taux de "refus"		15%
Résine			Résine	Tonnage	
PEBD sec	t/an	26	PEBD sec	t/an	148
PEHD sec	t/an	4	PEHD sec	t/an	22
PP sec	t/an	8	PP sec	t/an	46
PET sec	t/an	9	PET sec	t/an	52
Humidité	%	20%	Humidité	%	30,0%
	t/an	12		t/an	114
Tonnage total brut	t/an	59	Flux total	t/an	381

Valorisation énergétique			Valorisation énergétique		
Tonnage annuel plastique	t/an	28	Tonnage annuel plastique	t/an	158
Composition		Tonnage	Composition		Tonnage
PEBD sec	16%	5	PEBD	16%	26
PEHD sec	2%	1	PEHD	2%	4
PP	5%	1	PP	5%	8
PS	34%	9	PS	34%	54
PET	6%	2	PET	6%	9
Autres	36%	10	Autres	36%	58
Total	100%		Total	100%	
Humidité	20,0%	7	Humidité	30,0%	68
Tonnage total brut	t/an	35	Tonnage total brut	t/an	226

Sable			Sable		
Tonnage annuel sec	t/an	8	Tonnage annuel sec	t/an	47
Humidité	%	20%	Humidité	%	30%
	t/an	2		t/an	20
Tonnage total brut	t/an	10	Tonnage total brut	t/an	67

Biomasse			Biomasse		
Biomasse	0%	0	Biomasse	86%	992
Humidité	%	20%	Humidité	%	30%
	t/an	0		t/an	425
Tonnage total brut	t/an	0	Tonnage total brut	t/an	1417

Tableau 27 : Quantification des flux de déchets par résine et par voie de valorisation – scénario 1

6.5. Dimensionnement technique et économique

6.5.1. Description générale et briques techniques

Le principe général du scénario 1 est présenté en Figure 28 ci-dessous. Les équipements sont dimensionnés pour un fonctionnement en batch et une disponibilité horaire de 2 640 h/an (8 h/j, 330 j/an).

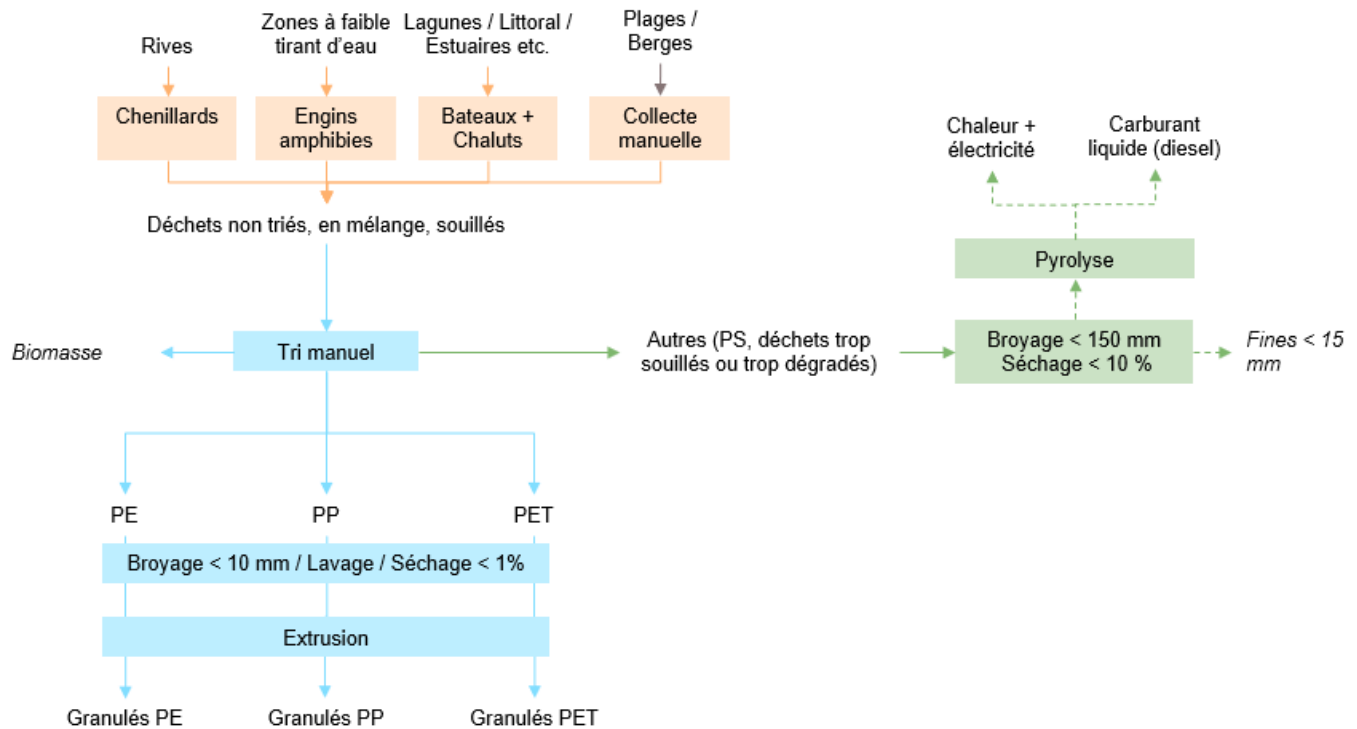


Figure 28 : description générale du scénario 1

6.5.2. Collecte

Pour ce scénario, la collecte sur les plages et les berges est effectuée manuellement par des employés, dont le salaire est équivalent à un salaire ouvrier. Il est estimé que 2 ETP sont nécessaires dans les charges annuelles et pas d'équipement particulier (ou du moins dont l'investissement est négligeable).

La collecte dans les autres compartiments environnementaux est effectuée :

- Au moyen de barrages flottant rudimentaires (puisque le gisement est très faible) pour les cours d'eau. Pour cette collecte les investissements pris en compte sont des barrages (boudins en travers du cours d'eau) et les charges annuelles comprennent la main d'œuvre de collecte et la maintenance des équipements
- Au moyen de chalut pour les estuaires, littoral et lagune. Au regard de la taille de gisement considéré et par soucis de minimisation des coûts, il s'avère peu pertinent pour l'organisme collecteur (collectivité) de disposer d'une flotte de bateaux dédiée. Ainsi, seuls deux chaluts sont considérés dans les investissements (base T2 de

CtoSea- Figure 29) et il est supposé que ces chaluts soient utilisés sur des bateaux de pêcheurs ou de particuliers. Les charges annuelles comprennent la rémunération du personnel navigant (estimé à 2 ETP techniciens) et le carburant pour le fonctionnement des bateaux de collecte et la maintenance des équipements (chaluts).



Figure 29 : Mise en œuvre du chalut T2 de CtoSea

6.5.3. *Tri manuel*

Les déchets collectés sont ensuite regroupés et triés manuellement. Pour cette étape plusieurs postes de coût sont inclus dans le calcul économique :


- Investissements – Une ligne de tri comprenant tapis roulant ainsi que les cabines de tri pour le personnel
- Charges annuelles
 - La maintenance des équipements
 - Le personnel de tri, estimé à 3 ETP (un technicien et deux ouvriers)
 - L'électricité pour le fonctionnement de la ligne de tri


6.5.4. *Recyclage mécanique*

Les lignes de recyclage mécanique sont au nombre de 3, pour le recyclage du PE, du PP et du PET. Chacune comprend un broyeur, une série de bacs de lavage, une centrifugeuse pour le séchage et une extrudeuse pour la production de granule. Il est statué que la ligne de recyclage mécanique fonctionne en batch, donc avec une disponibilité horaire de 2 640 h/an (8 h/jour, 330 jour/an).

Les équipements sélectionnés sont présentés ci-dessous (source Plastic Odyssey³⁴).


³⁴ <https://technology.plasticodyssey.org/machines-recyclage-plastique/>


Présentation du broyeur	
Technologie	Broyeur à couteau
Capacité	50 à 100 kg/h
Consommation électrique	Selon REX – 0,06 kWh/kg
Pertes lors du broyage	3%
Investissement	8 500 €
Visualisation	

Présentation des bacs de lavage	
Technologie	Mélangeur à pales rotatives
Capacité	50 kg/h
Consommation électrique	0,03 kWh/kg
Consommation eau	0,6 m ³ /kg
Pertes lors du lavage	1%
Investissement	1 400 €
Visualisation	

Note : la consommation d'eau a été estimée en majorant la consommation d'eau dans un procédé industriel de lavage de plastique pour le recyclage mécanique de 50 %. En général, la

consommation d'eau est d'environ 0,4 m³/kg de plastique³⁵, elle est fixée pour ce scénario à 0,6m³/kg.

Présentation de la centrifugeuse	
Technologie	Centrifugeuse verticale
Capacité	100 à 200 kg/h
Consommation électrique	0,045 kWh/kg
Investissement	4 000 €
Visualisation	

Présentation de l'extrudeuse	
Technologie	Extrudeuse monovis
Capacité	60 kg/h
Consommation électrique	0,55 kWh/kg
Pertes lors de l'extrusion	5%
Investissement	20 000 €
Visualisation	

En plus des équipements présentés ci-dessus sont inclus un trommel pour le dessablage en amont et un convoyeur de fines.

Les coûts liés au fonctionnement des lignes de recyclage mécanique sont :

- Les investissements – Broyeur, Bacs de lavage, Centrifugeuse, Extrudeuse
- Les charges annuelles
 - Maintenance des équipements
 - Main d'œuvre estimée à 6 ETP ouvriers

³⁵ Base de données Ecoinvent v. 3.7.1

- La consommation d'électricité
- La consommation d'eau pour le lavage
- Le traitement des eaux usées
- Le traitement des résidus solides issus des pertes à chaque étape

6.5.5. **Valorisation énergétique**

La ligne de valorisation énergétique est basée sur la solution du fournisseur Polycrack, fonctionnant en batch (disponibilité horaire de 2 640 h/an). Elle comprend :

- L'unité de pyrolyse (incluant broyage, trommel pour dessablage, reformer pour la conversion de l'huile de pyrolyse en diesel, cogénération pour la production d'électricité à partir du gaz de pyrolyse résiduel et stockages amont et aval)
- Une unité de traitement des off-gas de cogénération (lits d'adsorbants type charbon actif pour l'élimination de l'H₂S, du NH₃, de l'HCl et des COV).

Les coûts liés à la valorisation énergétique incluent :

- Les investissements pour l'unité de pyrolyse et pour l'unité de traitement, ainsi que des frais de livraison, installation et mise en service
- Les charges annuelles :
 - Maintenance des équipements
 - La main d'œuvre, estimée à 2 ETP techniciens
 - L'électricité pour la ligne de pyrolyse et de traitement du gaz
 - L'achat des consommables pour le traitement du gaz
 - L'élimination des résidus solides (char de la pyrolyse)
 - L'élimination des résidus de traitement (adsorbants en fin de vie)

6.6. Analyse économique

6.6.1. **Hypothèses économiques**

Dans les investissements, est également ajouté un supplément pour le foncier de 500 000 € (conservateur) ainsi que les coûts d'étude et ingénierie (10% des investissements) et une part d'aléas (10%). Dans les charges annuelles est ajoutée une dépense liée aux assurances, à hauteur de 0,5% des investissements. Pour le reste des calculs, les hypothèses suivantes sont utilisées (Tableau 28) :

Tableau 28 : Hypothèses économiques utilisées

Hypothèses et données économiques		
Coûts des consommables		
Electricité	120	€/MWh
Chaleur	25	€/MWh
Eau réseau	5	€/m ³
Gasoil	1,2	€/L
Vente produits		
Electricité	120	€/MWh
Chaleur	25	€/MWh
Diesel	1,2	€/L
% décôte vente r-plastique	30%	
PE	690	€/T
PP	960	€/T
PET	680	€/T
Redevance déchets	0	€/T
Main d'œuvre		
1 ETP technicien	45 000	€/an
1 ETP ouvrier	28 000	€/an
Gestion des résidus		
Evacuation des cendres et particules	150	€/T
Evacuation eau égouts	5	€/m3
Evacuation et traitement du catalyseur	150	€/T

En ce qui concerne le prix de vente des granulés de plastiques recyclé, celui-ci est basé sur les données Polyvia ³⁶, **et minoré de 30% de manière à compenser la qualité qui pourrait être moins bonne du fait d'un procédé batch et low-cost.**

³⁶ <https://www.polyvia.fr/fr/economie/le-marche-des-matieres-plastiques-recyclees-en-pleine-transition>

6.6.2. **Décomposition des CAPEX, OPEX et PRODUITS****Tableau 29 : Détail des CAPEX - scénario 1**

INVESTISSEMENTS		2 420 000 €	
Catégorie A : Collecte des déchets		965 000 €	
A1	Matériels de collecte	965 000 €	
Catégorie B : Infrastructure		500 000 €	
B1	Génie Civil	500 000 €	
Catégorie C : Elimination des inertes et tri		73 700 €	
C1	Equipements (trommel, convoyage, tapis roulant et cabine de tri)	73 700 €	
Catégorie D : Préparation + extrusion PE		65 200 €	
D1	Equipements	65 200 €	
D1.1	Broyeur	17 000 €	
D1.2	Bac de lavage	4 200 €	
D1.3	Sécheur (centrifugeuse)	4 000 €	
D1.4	Extrusion	40 000 €	
Catégorie E : Préparation + extrusion PP		33 900 €	
E1	Equipements	33 900 €	
E1.1	Broyeur	8 500 €	
E1.2	Bac de lavage	1 400 €	
E1.3	Sécheur (centrifugeuse)	4 000 €	
E1.4	Extrusion	20 000 €	
Catégorie F : Préparation + extrusion PET		33 900 €	
F1	Equipements	33 900 €	
F1.1	Broyeur	8 500 €	
F1.2	Bac de lavage	1 400 €	
F1.3	Sécheur (centrifugeuse)	4 000 €	
F1.4	Extrusion	20 000 €	
Catégorie G : Procédés de valorisation énergétique		430 000 €	
G1	Unités de pyro-gazéification	430 000 €	
G1.1	Unité de pyrolyse (préparation intrant, pyrolyse, reformer, cogénération, stockages)	321 000 €	
G1.2	Traitement du gaz	9 500 €	
G1.3	Etude livraison montage	99 500 €	
Catégorie H : Ingénierie & divers		320 000 €	
H1	Chantiers divers - aléas non prévus	162 000 €	
H2	Etudes / Ingénierie	162 000 €	

Tableau 30 : Détail des produits - scénario 1

PRODUITS			394 100 €	
P1	Vente de matériaux	287	T_brut/an	210 450 €
P1.1	PET	56	T/an	680 €
P1.2	PE	182	T/an	690 €
P1.3	PP	49	T/an	960 €
P2	Redevance Déchets	702	T_brut/an	-
P3	Production d'électricité	240	MWh/an	120,0
P4	Production de chaleur	279	MWh/an	25,0
P5	Production diesel	125 041	L/an	1,15
				143 800 €

Tableau 31 : Détail des OPEX - scénario 1

CHARGES					
Charges fixes				518 227 €	
CF1	Maintenance			29 000 €	
CF1.1	<i>Matériels de collecte</i>	%Inv.	1,0%	9 600 €	
CF1.2	<i>Elimination des inertes et tri</i>	%Inv.	3,0%	2 200 €	
CF1.3	<i>Préparation + extrusion PE</i>	%Inv.	3,0%	1 900 €	
CF1.4	<i>Préparation + extrusion PP</i>	%Inv.	3,0%	1 000 €	
CF1.5	<i>Préparation + extrusion PET</i>	%Inv.	3,0%	1 000 €	
CF1.6	<i>Procédés de valorisation énergétique</i>	%Inv.	3,0%	13 300 €	
CF2	Main d'œuvre			505 000 €	
CF2.1	<i>Exploitation pyrolyse</i>	2,00	ETP	45 000 €	90 000 €
CF2.2	<i>Exploitation Ligne de tri</i>	1,00	ETP	45 000 €	45 000 €
CF2.3	<i>Manutention recyclage</i>	6,00	ETP	28 000 €	168 000 €
CF2.4	<i>Equipage navigant</i>	2,00	ETP	45 000 €	90 000 €
CF2.6	<i>Collecteurs de déchets</i>	2,00	ETP	28 000 €	56 000 €
CF2.7	<i>Employés tri</i>	2,00	ETP	28 000 €	56 000 €
CF3	Autres charges fixes				12 200 €
CF3.1	<i>Assurances</i>	%Inv.	0,50%	12 200 €	
Charges variables				89 000 €	
CV1	Achat gasoil				17 300 €
CV2	Consommation électrique				54 500 €
CV3	Consommables traitement du gaz				3 000 €
CV4	Gestion des cendres et résidus	76	T/an		13 000 €
CV4.1	<i>Elimination du char</i>	39	T/an	150 €	5 900 €
CV4.2	<i>Traitement eau usée recyclage mécanique</i>	347	m ³ /an	5 €	1 700 €
CV4.3	<i>Elimination des résidus de recyclage</i>	32	T/an	150 €	4 700 €
CV4.4	<i>Elimination des résidus de traitement des fumées</i>	5	T/an	150 €	700 €
CV5	Eau pour lavage	230	m³/an		1 200 €

6.6.3. Résultats – coût de traitement et coûts de production

a. Méthode de calcul

Afin de pouvoir juger de la faisabilité d'une telle filière et de la comparer à l'existant (pour le traitement et la valorisation des plastiques terrestres), le coût de traitement par tonne de déchet plastique a été calculé (Tableau 32 et Tableau 34). La formule est la suivante, en considérant un amortissement des investissements sur 15 ans :

$$\text{Coût de traitement} = \frac{\frac{\text{CAPEX}}{15} + \text{OPEX} - \text{PRODUITS}}{\text{Tonnes annuelles de déchets plastiques collectées}}$$

Pour disposer d'un angle de comparaison différent, le coût de production des différents produits a été calculé (Tableau 33 et Tableau 35), à savoir :

→ Coût de production du diesel

- Coût de production des granulés de PE
- Coût de production des granulés de PP
- Coût de production des granulés de PET

Pour cela, la formule suivante a été utilisée :

$$\text{Coût de production} = \frac{\text{CAPEX}}{15} + \text{OPEX} - \text{PRODUITS (coproduits)}$$

Tonnes de granulés produites ou litres de diesel produits

Les coûts d'investissement et les charges annuelles communs aux filières (PE, PP, PET et diesel) ont été répartis suivant une allocation massique sur la base du gisement de départ.

- b. Résultats pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique

Tableau 32 : Coûts de traitement pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique

Armortissement	COUT DE TRAITEMENT		
15 ans	Montant annuel	Coût de traitement € la tonne de plastique (souillé & humide)	Répartition
OPEX	633 000 €/an	900 €/T	80%
Maintenance	29 000 €/an	41 €/T	5%
Main d'œuvre	505 000 €/an	720 €/T	80%
Assurance et contrôles	12 000 €/an	17 €/T	2%
Electricité	54 000 €/an	77 €/T	9%
Gasoil	17 000 €/an	24 €/T	3%
Traitement dues émissions pyrolyse	3 000 €/an	4 €/T	0%
Elimination des résidus solides et liquides	13 000 €/an	19 €/T	2%
Amortissements CAPEX	160 000 €	230 €/T	20%
Aménagement du site	33 000 €/an	47 €/T	20%
Collecte des déchets	64 000 €/an	91 €/T	40%
Elimination des inertes et tri	5 000 €/an	7 €/T	3%
Préparation + extrusion PE	4 000 €/an	6 €/T	2%
Préparation + extrusion PP	2 000 €/an	3 €/T	1%
Préparation + extrusion PET	2 000 €/an	3 €/T	1%
Procédés de valorisation énergétique	29 000 €/an	41 €/T	18%
Ingénierie & divers	21 000 €/an	30 €/T	13%
Coût de traitement brut		1 130 €/T	
Co-produits	391 000 €/an	-560 €/an	
Diesel	144 000 €/an	-210 €/T	38%
Electricité	29 000 €/an	-40 €/T	7%
Chaleur	7 000 €/an	-10 €/T	2%
Granules de PE	126 000 €/an	-180 €/T	32%
Granules de PP	47 000 €/an	-70 €/T	13%
Granules de PET	38 000 €/an	-50 €/T	9%
Coût de traitement net hors sub.		570 €/T	

Tableau 33 : Coûts de production pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique :

Coûts de production nets	
Coût de production diesel	2,4 €/L
Coût de production PE	1 600 €/T
Coût de production PP	1 600 €/T
Coût de production PET	1 600 €/T

Il apparaît donc que dans le cas de la mise en place d'une filière de valorisation et traitement à petite échelle (500 t/an de déchets plastiques) et en fonctionnement batch, le coût de traitement à la tonne de déchets s'élève à 570 €/T, ce qui est très supérieur à des solutions de traitement par incinération (150 €/T). En revanche, les coûts de production calculés pour le diesel et les différentes résines recyclées (PE, PP et PET) sont largement supérieurs aux coûts du marché.

c. Résultats dans le cas d'une seule filière valorisation énergétique de la globalité du gisement

Tableau 34 : Coûts de traitement dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement

Armortissement	COUT DE TRAITEMENT		
15 ans	Montant annuel	Coût de traitement € la tonne de plastique (souillé & humide)	Répartition
OPEX	587 000 €/an	840 €/T	77%
Maintenance	35 000 €/an	50 €/T	6%
Main d'œuvre	427 000 €/an	608 €/T	72%
Assurance et contrôles	13 000 €/an	19 €/T	2%
Electricité	74 000 €/an	105 €/T	13%
Gasoil	17 000 €/an	24 €/T	3%
Traitement dues émissions pyrolyse	5 000 €/an	7 €/T	1%
Elimination des résidus solides et liquides	16 000 €/an	23 €/T	3%
Amortissements CAPEX	178 000 €	250 €/T	23%
Aménagement du site	33 000 €/an	47 €/T	19%
Collecte des déchets	64 000 €/an	91 €/T	36%
Elimination des inertes et tri	5 000 €/an	7 €/T	3%
Préparation + extrusion PE	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PP	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PET	0 €/an	0 €/T	0%
Procédés de valorisation énergétique	52 000 €/an	74 €/T	30%
Ingénierie & divers	24 000 €/an	34 €/T	14%
Coût de traitement brut	1 090 €/T		
Co-produits	482 000 €/an	-690 €/an	
Diesel	386 000 €/an	-550 €/T	80%
Electricité	77 000 €/an	-110 €/T	16%
Chaleur	19 000 €/an	-30 €/T	4%
Granules de PE	0 €/an	0 €/T	0%
Granules de PP	0 €/an	0 €/T	0%
Granules de PET	0 €/an	0 €/T	0%
Coût de traitement net hors sub.		400 €/T	

Tableau 35 : Coût de production du diesel dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement

Coûts de production nets	
Coût de production diesel	2,0 €/L

Etant donné le coût de production obtenu pour le recyclage mécanique des résines plastiques PE, PP et PET, l'exercice de dimensionnement a également été réalisé pour une filière unique de valorisation énergétique de l'ensemble du gisement de déchets plastique, toujours sur un gisement faible de 500t/an et pour un fonctionnement en batch. Il apparaît dans ce cas que le coût de traitement à la tonne de déchet est plus faible, de l'ordre de 400 €/T et que le coût de production du diesel est abaissé à 2€/l. En revanche, ce coût de production reste très largement supérieur au prix marché.

7. Scénario 2 – valorisation et traitement des déchets mutualisés aux déchets terrestres

7.1. Présentation du scénario 2

7.1.1. Gisement

a. Composition

La composition du gisement pour ce scénario est considérée identique au gisement utilisé pour le scénario 1, à savoir basé sur la part de des plastiques dans les déchets ménagers caractérisée dans le MODECOM 2017.

b. Quantification

Ce scénario est construit sur le principe de la mutualisation du flux de déchets plastiques marins et flottants avec un flux de déchets plastiques terrestre qui serait destiné à une filière de valorisation énergétique.

Ainsi, le même flux de déchets plastique que le scénario 1 de 500 t/an est considéré, une partie étant destinée à la valorisation matière et une autre à la valorisation énergétique, en se basant sur les mêmes hypothèses dimensionnantes.

Néanmoins, la part de ce gisement destinée à la valorisation énergétique est ensuite mutualisée à 2 500 t/an d'un gisement terrestre de déchets plastiques (ayant la même composition pour dans un but de simplification du modèle).

Le Tableau 36 Tableau 27 ci-dessus quantifie les différents flux de déchets plastique, par résine et par voie de valorisation. Ainsi, les deux flux orientés vers le recyclage mécanique et vers la valorisation énergétique peuvent être décrits comme suit (Tableau 36,

Tableau 37 et Tableau 38) :

Tableau 36 : Quantification des flux de déchets par résine et par voie de valorisation – scénario 2

Plages, berges, interface terre-mer			Embouchures cours d'eau et flottants		
Gisement			Gisement		
Tonnage total	t/an	104	Tonnage total	t/an	2091
Composition	%	t/an	Composition	%	t/an
Humidité	20%	21	% humidité	30%	627
Sable	10%	8	% sable	10%	47
Biomasse	0%	0	% biomasse	70%	992
Tonnage plastique	t/an	75	Tonnage plastique	t/an	425
Composition résine	%	t/an	Composition	%	t/an
PEBD sec	41%	30,675	PEBD sec	41%	173,825
PEHD sec	6%	4,5	PEHD sec	6%	25,5
PP sec	12,60%	9,45	PP sec	12,60%	53,55
PS sec	12,60%	9,45	PS sec	12,60%	53,55
PET sec	14%	10,8	PET sec	14%	61,2
Autres sec	14%	10,2	Autres sec	14%	57,8
Total	100%		Total	100%	

Plages, berges, interface terre-mer			Embouchures cours d'eau et flottants		
Recyclage mécanique			Recyclage mécanique		
Taux de "refus"		15%	Taux de "refus"		15%
Résine			Résine		
PEBD sec	t/an	26	PEBD sec	t/an	148
PEHD sec	t/an	4	PEHD sec	t/an	22
PP sec	t/an	8	PP sec	t/an	46
PET sec	t/an	9	PET sec	t/an	52
Humidité	%	20%	Humidité	%	30,0%
	t/an	12		t/an	114
Tonnage total brut	t/an	59	Flux total	t/an	381

Plages, berges, interface terre-mer			Embouchures cours d'eau et flottants		
Valorisation énergétique			Valorisation énergétique		
Tonnage annuel plastique s	t/an	28	Tonnage annuel plastique	t/an	158
Composition		Tonnage	Composition		Tonnage
PEBD sec	16%	5	PEBD sec	16%	26
PEHD sec	2%	1	PEHD sec	2%	4
PP sec	5%	1	PP sec	5%	8
PS sec	34%	9,45	PS sec	34%	53,55
PET sec	6%	2	PET sec	6%	9
Autres sec	36%	10,2	Autres sec	36%	57,8
Total	100%		Total	100%	
Humidité	20,0%	7	Humidité	30,0%	68
Tonnage total brut	t/an	35	Tonnage total brut	t/an	226

Plages, berges, interface terre-mer			Embouchures cours d'eau et flottants		
Sable			Sable		
Tonnage annuel sec	t/an	8	Tonnage annuel sec	t/an	47
Humidité	%	20%	Humidité	%	30%
	t/an	2		t/an	20
Tonnage total brut	t/an	10	Tonnage total brut	t/an	67

Plages, berges, interface terre-mer			Embouchures cours d'eau et flottants		
Biomasse			Biomasse		
Biomasse	0%	0	Biomasse	86%	992
Humidité	%	20%	Humidité	%	30%
	t/an	0		t/an	425
Tonnage total brut	t/an	0	Tonnage total brut	t/an	1417

Tableau 37 : Quantification des flux de déchets terrestres par résine pour la mutualisation – scénario 2

Valorisation énergétique		
Tonnage annuel plastique	t/an	2500
Composition		Tonnage
PEBD	40,9%	1023
PEHD	6,0%	150
PP	12,6%	315
PS	12,6%	315
PET	14,4%	360
Autres	13,6%	340
Total	100%	
Humidité	20,00%	625
Tonnage total brut	t/an	3 125

Tableau 38 : Description quantitative des flux recyclage mécanique et flux valorisation énergétique – scénario 2

Valorisation énergétique		
Tonnage annuel plastique	t/an	2686
Composition		Tonnage
PEBD	39,2%	1053
PEHD	5,7%	155
PP	12,1%	324
PS	14,1%	378
PET	13,8%	371
Autres	15,2%	408
Total	100%	
Humidité	20,67%	700
Tonnage total brut	t/an	3 386
Recyclage mécanique		
Résine		Tonnage
PEBD sec	t/an	174
PEHD sec	t/an	26
PP sec	t/an	54
PET sec	t/an	61
Humidité	%	28,7%
	t/an	126
Flux total	t/an	441

7.2. Dimensionnement technique

Le principe général du scénario 2 est présenté en Figure 30 ci-dessous. Les équipements sont dimensionnés pour un fonctionnement en continu et une disponibilité horaire de 7500 h/an (24 h/j, 330 j/an).

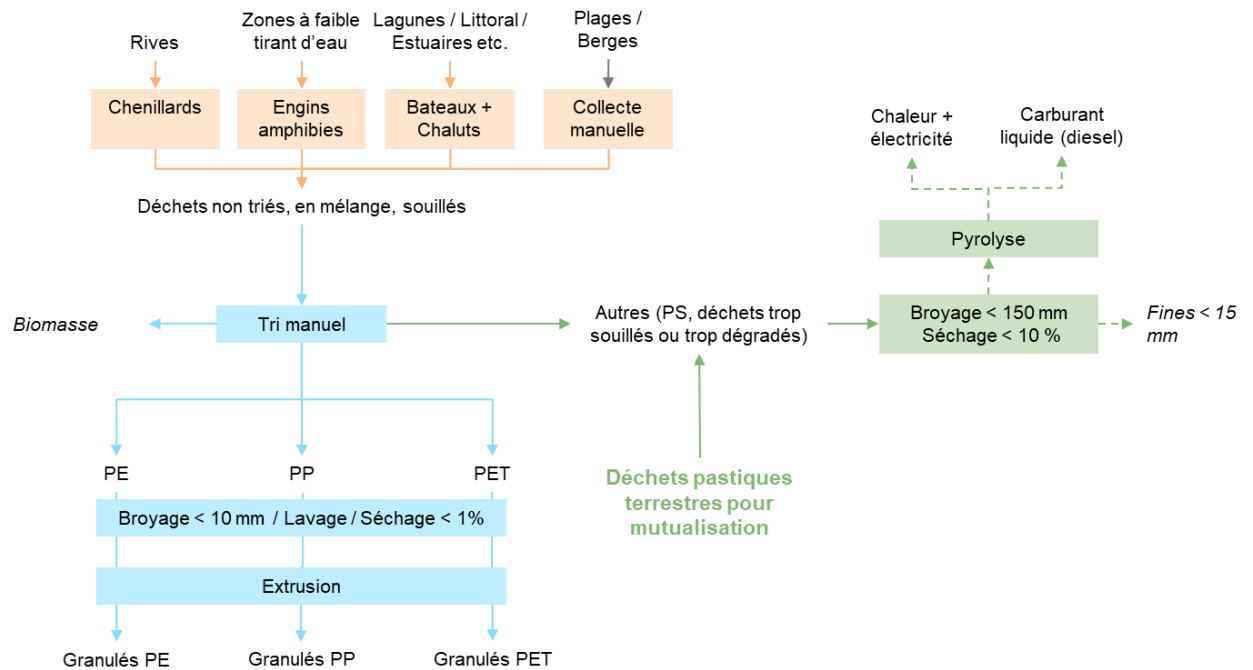


Figure 30: description générale du scénario 2

2.2.2. Collecte

Le dimensionnement est identique au scénario 1.

Un coût de collecte des déchets terrestres est ajouté aux charges variables, à hauteur de 50€/t de déchets collectés.

7.2.1. Tri manuel

Le dimensionnement pour la chaîne de tri est équivalent au scénario 1.

7.2.2. Recyclage mécanique

Pour le scénario 2, les lignes de recyclage mécaniques sont équivalentes au scénario 1 à la différence près qu'elles sont conçues pour un fonctionnement en continu. Ainsi, la capacité horaire des machines est abaissée et le nombre d'ETP nécessaires pour le fonctionnement est réduit. Néanmoins les mêmes briques process sont présentes :

- Broyeur
- Bacs de lavage
- Centrifugeuse
- Extrudeuse
- Trommel pour le dessablage en amont et convoyeur de fines.

Les coûts liés au fonctionnement des lignes de recyclage mécanique sont :

- Les investissements
- Les charges annuelles
 - Maintenance des équipements
 - Main d'œuvre estimée à 3 ETP ouvriers

- La consommation d'électricité
- La consommation d'eau pour le lavage
- Le traitement des eaux usées
- Le traitement des résidus solides issus des pertes à chaque étape

7.2.3. **Valorisation énergétique**

La ligne de valorisation énergétique est basée sur la solution du fournisseur Polycrack, fonctionnant en continu (disponibilité horaire de 7 500 h/an). Elle comprend les même briques process que pour l'unité de pyrolyse considérée au scénario 1 à savoir :

- L'unité de pyrolyse (incluant broyage, trommel pour dessablage, reformer pour la conversion de l'huile de pyrolyse en diesel, cogénération pour la production d'électricité à partir du gaz de pyrolyse résiduel et stockages amont et aval)
- Une unité de traitement des off-gas de cogénération (lits d'adsorbants type charbon actif pour l'élimination de l'H₂S, du NH₃, de l'HCl et des COV).

Les coûts liés à la valorisation énergétique incluent :

- Les investissements pour l'unité de pyrolyse et pour l'unité de traitement, ainsi que des frais de livraison, installation et mise en service
- Les charges annuelles :
 - Maintenance des équipements
 - La main d'œuvre, estimée à 3 ETP techniciens (capacité plus important du fait de la mutualisation mais fonctionnement en continu)
 - L'électricité pour la ligne de pyrolyse et de traitement du gaz
 - L'achat des consommables pour le traitement du gaz
 - L'élimination des résidus solides (char de la pyrolyse)
 - L'élimination des résidus de traitement (adsorbants en fin de vie)

7.3. Analyse économique

7.3.1. **Hypothèses économiques**

Dans les investissements, est également ajouté un supplément pour le foncier de 1 000 000 € (très conservateur) ainsi que les coûts d'étude et ingénierie (10% des investissements) et une part d'aléas (10%). Dans les charges annuelles est ajoutée une dépense liée aux assurances, à hauteur de 0,5% des investissements. Pour le reste des calculs, les hypothèses présentées au scénario 1 sont utilisées (Tableau 28).

7.3.2. **Décomposition des CAPEX, OPEX et des PRODUITS****Tableau 39 : Détail des CAPEX - scénario 2 (+/- 30%)**

INVESTISSEMENTS		5 820 000 €
Catégorie A : Collecte des déchets		965 000 €
A1	Matériels de collecte	965 000 €
Catégorie B : Infrastructure		1 000 000 €
B1	Génie Civil	1 000 000 €
Catégorie C : Elimination des inertes et tri		73 700 €
C1	Equipements (trommel, convoyage, tapis roulant et cabine de tri)	73 700 €
Catégorie D : Préparation + extrusion PE		65 000 €
Catégorie E : Préparation + extrusion PP		30 000 €
Catégorie F : Préparation + extrusion PET		32 000 €
Catégorie G : Procédés de valorisation énergétique		2 853 000 €
G1	Unités de pyro-gazéification	2 853 000 €
G1.1	Unité de pyrolyse (préparation intrant, pyrolyse, reformer, cogénération, stockages)	2 130 000 €
G1.2	Traitement du gaz	83 000 €
G1.3	Etude livraison montage	640 000 €
Catégorie H : Ingénierie & divers		800 000 €
H1	Chantiers divers - aléas non prévus	400 000 €
H2	Etudes / Ingénierie	400 000 €

Tableau 40 : Détail des produits - scénario 2

PRODUITS			2 800 000 €	
P1	Vente de matériaux	287	T_brut/an	210 420 €
P1.1	PET	56	T/an	680 €
P1.2	PE	182	T/an	690 €
P1.3	PP	49	T/an	960 €
P2	Redevance Déchets	3 827	T_brut/an	-
P3	Production d'électricité	3 463	MWh/an	120,0
P4	Production de chaleur	4 025	MWh/an	25,0
P5	Production diesel	1 801 870	L/an	1,2
				2 072 150 €

Tableau 41 : Détail des OPEX - scénario 2 (+/- 30%)

CHARGES				
Charges fixes				596 000 €
CF1	Maintenance			101 000 €
CF1.1	<i>Matériels de collecte</i>		<i>%Inv.</i> 1,0%	9 600 €
CF1.2	<i>Elimination des inertes et tri</i>		<i>%Inv.</i> 3,0%	2 200 €
CF1.3	<i>Préparation + extrusion PE</i>		<i>%Inv.</i> 3,0%	2 000 €
CF1.4	<i>Préparation + extrusion PP</i>		<i>%Inv.</i> 3,0%	1 000 €
CF1.5	<i>Préparation + extrusion PET</i>		<i>%Inv.</i> 3,0%	675 €
CF1.6	<i>Procédés de valorisation énergétique</i>		<i>%Inv.</i> 3,0%	85 700 €
CF2	Main d'œuvre			466 000 €
CF2.1	<i>Exploitation pyrolyse</i>	2,00	<i>ETP</i> 45 000 €	135 000 €
CF2.2	<i>Exploitation Ligne de tri</i>	1,00	<i>ETP</i> 45 000 €	45 000 €
CF2.3	<i>Manutention recyclage</i>	5,00	<i>ETP</i> 28 000 €	84 000 €
CF2.4	<i>Equipage navigant</i>	2,00	<i>ETP</i> 45 000 €	90 000 €
CF2.6	<i>Collecteurs de déchets</i>	2,00	<i>ETP</i> 28 000 €	56 000 €
CF2.7	<i>Employés tri</i>	2,00	<i>ETP</i> 28 000 €	56 000 €
CF3	Autres charges fixes			29 000 €
CF3.1	<i>Assurances</i>		<i>%Inv.</i> 0,50%	29 000 €
Charges variables				545 650 €
CV1	Achat gasoil			17 300 €
CV2	Consommation électrique			254 400 €
CV3	Consommables traitement du gaz			19 000 €
CV4	Gestion des cendres et résidus	76	T/an	97 500 €
CV4.1	<i>Elimination du char</i>	39	<i>T/an</i> 150 €	80 880 €
CV4.2	<i>Traitement eau usée recyclage mécanique</i>	347	<i>m³/an</i> 5 €	1 750 €
CV4.3	<i>Elimination des résidus de recyclage</i>	32	<i>T/an</i> 150 €	4 700 €
CV4.4	<i>Elimination des résidus de traitement des fumées</i>	5	<i>T/an</i> 150 €	10 200 €
CV5	Eau pour lavage	230	m³/an	1 200 €
CV6	Collecte des déchets plastiques terrestres	50	€/T	156 250 €

7.3.3. Résultats – coût de traitement et coûts de production

c. Méthode de calcul

Afin de pouvoir juger de la faisabilité d'une telle filière et de la comparer à l'existant (pour le traitement et la valorisation des plastiques terrestres), le coût de traitement par tonne de déchet plastique a été calculé (Tableau 32 et Tableau 34). La formule est la même que pour le scénario 1.

Pour disposer d'un angle de comparaison différent, le coût de production des différents produits a été calculé (Tableau 33 et Tableau 35), à savoir :

- Coût de production du diesel
- Coût de production des granulés de PE
- Coût de production des granulés de PP

→ Coût de production des granulés de PET

Pour cela, la même formule que pour le scénario 1 a été utilisée.

Les coûts d'investissement et les charges annuelles communs aux filières (PE, PP, PET et diesel) ont été répartis suivant une allocation massique sur la base du gisement de départ.

d. Résultats pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique

Tableau 42 : Coûts de traitement pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique (+/- 30%)

Armortissement	COUT DE TRAITEMENT		
15 ans	Montant annuel	Coût de traitement € la tonne de plastique (souillé & humide)	Répartition
OPEX	1 150 000 €/an	330 €/T	75%
Maintenance	100 000 €/an	30 €/T	9%
Main d'œuvre	470 000 €/an	120 €/T	36%
Assurance et contrôles	30 000 €/an	10 €/T	3%
Electricité	250 000 €/an	60 €/T	18%
Gasoil	20 000 €/an	10 €/T	3%
Traitement dues émissions pyrolyse	20 000 €/an	10 €/T	3%
Elimination des résidus solides et liquides	100 000 €/an	30 €/T	9%
Collecte des déchets terrestres	160 000 €/an	40 €/T	
Amortissements CAPEX	370 000 €	110 €/T	25%
Aménagement du site	70 000 €/an	18 €/T	16%
Collecte des déchets	60 000 €/an	15 €/T	14%
Elimination des inertes et tri	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PE	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PP	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PET	0 €/an	0 €/T	0%
Procédés de valorisation énergétique	190 000 €/an	49 €/T	44%
Ingénierie & divers	50 000 €/an	13 €/T	12%
Coût de traitement brut		440 €/T	
Co-produits	2 810 000 €/an	-720 €/an	
Diesel	2 070 000 €/an	-530 €/T	74%
Electricité	420 000 €/an	-110 €/T	15%
Chaleur	100 000 €/an	-30 €/T	4%
Granules de PE	130 000 €/an	-30 €/T	4%
Granules de PP	50 000 €/an	-10 €/T	1%
Granules de PET	40 000 €/an	-10 €/T	1%
Coût de traitement net hors sub.		-280 €/T	

Tableau 43 : Coûts de production pour une combinaison filière de recyclage mécanique et filière de valorisation énergétique :

Coûts de production nets	
Coût de production diesel	0,50 €/L
Coût de production PE	560 €/T
Coût de production PP	590 €/T
Coût de production PET	590 €/T

Il apparaît donc que dans le cas de la mise en place d'une filière de valorisation et traitement à petite échelle (500 t/an de déchets plastiques) des déchets flottants et marins, avec une mutualisation à un gisement plastique terrestre pour la valorisation énergétique, le coût de traitement à la tonne de déchets est de -280 €/T. De plus, les coûts de production calculés pour le diesel et les différentes résines recyclées (PE, PP et PET) sont inférieurs aux prix du marché, ce qui permettrait d'assurer la rentabilité économique de la filière (à valider par un affinement des consultations sur les équipements et la réalisation d'un business plan).

e. Résultats dans le cas d'une seule filière valorisation énergétique de la globalité du gisement

Tableau 44 : Coûts de traitement dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement

Armortissement	COUT DE TRAITEMENT		
15 ans	Montant annuel	Coût de traitement € la tonne de plastique (souillé & humide)	Répartition
OPEX	1 160 000 €/an	330 €/T	75%
Maintenance	100 000 €/an	30 €/T	9%
Main d'œuvre	470 000 €/an	120 €/T	36%
Assurance et contrôles	30 000 €/an	10 €/T	3%
Electricité	260 000 €/an	70 €/T	21%
Gasoil	20 000 €/an	10 €/T	3%
Traitement dues émissions pyrolyse	20 000 €/an	10 €/T	3%
Elimination des résidus solides et liquides	100 000 €/an	30 €/T	9%
Collecte des déchets terrestres	160 000 €/an	40 €/T	
Amortissements CAPEX	384 000 €	110 €/T	25%
Aménagement du site	70 000 €/an	18 €/T	16%
Collecte des déchets	60 000 €/an	15 €/T	14%
Elimination des inertes et tri	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PE	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PP	0 €/an	0 €/T	0%
Préparation + extrusion PET	0 €/an	0 €/T	0%
Procédés de valorisation énergétique	204 000 €/an	52 €/T	48%
Ingénierie & divers	50 000 €/an	13 €/T	12%
Coût de traitement brut		440 €/T	
Co-produits	2 880 000 €/an	-740 €/an	
Diesel	2 310 000 €/an	-590 €/T	80%
Electricité	460 000 €/an	-120 €/T	16%
Chaleur	110 000 €/an	-30 €/T	4%
Granules de PE	0 €/an	0 €/T	0%
Granules de PP	0 €/an	0 €/T	0%
Granules de PET	0 €/an	0 €/T	0%
Coût de traitement net hors sub.		-300 €/T	

Tableau 45 : Coût de production du diesel dans le cas d'une seule filière de valorisation énergétique de la globalité de gisement

Coûts de production nets	
Coût de production diesel	0,4 €/L

L'exercice de dimensionnement a également été réalisé pour une filière unique de valorisation énergétique de l'ensemble du gisement de déchets plastique, toujours sur un gisement faible de 500 t/an, mutualisé à 2 500 t de déchets plastiques terrestres. Il apparaît dans ce cas que le coût de traitement à la tonne de déchet est plus faible, de l'ordre de -300 €/T et que le coût de production du diesel est abaissé à 0,4 €/l, ce qui est très largement inférieur au prix du marché.

Conclusion générale

Les entretiens d'experts, la consultation de la littérature scientifique, le travail de benchmark et d'analyse technico-économique réalisés ont permis d'apporter des éléments de réponses aux questions portées par les différents intervenants sur cette étude.

1. Quelles sont les principales sources de pollutions des milieux aquatiques et marins aux plastiques ?

Les sources de contaminations des milieux marins au plastique sont nombreuses. A l'échelle mondiale, les récents travaux prenant en compte les différents mécanismes de transferts ont montré que ce sont les rivières urbaines les principales contributrices (cf CR LEESU).

Cette modélisation a permis d'identifier 18 rivières à la Martinique émettant 7 800 kg de plastique par an, 14 rivières à la Guadeloupe émettant 4 000 kg de plastique par an et 13 rivières en Guyane Française (dont deux fleuves frontières) émettant 40 700 kg de plastique par an. Les émissions des autres DROM/COM français ne sont pas été caractérisées dans cette base de données. En France Métropolitaine, on compte 186 rivières et fleuves émetteurs pour une estimation de 227 800 kg de plastique émis en milieu marin par an.

La caractérisation du transport et de la dégradation des plastiques est en cours. Les outils de modélisation numérique (cf CR CECI/ CEFRACS) et le tracking de balises argos (cf CR CLS) sont utilisés en milieu marin. Ces outils permettent d'anticiper les accumulations de plastiques flottants et d'identifier leur origine.

En milieu aquatique, la modélisation du transport est beaucoup plus complexe qu'en milieu marin. Les indicateurs géographiques varient d'une rivière à l'autre. Les différentes campagnes de tracking réalisées montrent l'importance des phénomènes de lessivage et d'emprisonnement. Les crues, par exemple vont générer des phénomènes de transports latéraux (dans les champs) comme sur le bassin de la Seine et du déversement direct avec accumulations sur les plages comme à Marseille en 2021 (cf CR LEESU).

La majorité des plastiques déversés en mer provient probablement des phénomènes de lessivages des rivières urbaines. Le transport des plastiques en milieu aquatique est complexe et encore mal décrit. Il dépend de la géographie et de l'aménagement du territoire de chaque bassin versant. Il semble toutefois qu'une grande partie des plastiques présents dans les fleuves soit retenus et dégradés dans les estuaires. Ils sont rejetés en mer sous forme de microplastiques.

2. Comment est impacté le cycle de vie des plastiques en milieu aquatique et marin ?

La « plastisphère » reste très mal décrite. En milieu marin, on constate seulement que les plastiques sont transportés sur de grandes distances et servent de support à un grand nombre d'espèces chimiques et vivantes: (cf CR Tara).

Lors du transport des plastiques, le rayonnement UV va rapidement dégrader les polymères. La photo-oxydation est le principal facteur de dégradation de la majorité des plastiques présents dans les milieux aquatiques et marins, en provoquant la détérioration des liaisons moléculaires. Ainsi, les plastiques perdent leurs caractéristiques techniques. Dans un second temps, les phénomènes physiques (frottements) vont réduire le matériau en particules. La cinétique de dégradation dépend donc des conditions météorologiques locales et de la nature des plastiques (cf CR LEESU)

Les plastiques collectés dans les réseaux d'eaux pluviales sont souvent très peu dégradés, mais potentiellement pollués par des hydrocarbures, des métaux ou autres composés pouvant s'adsorber sur la surface. Avec le temps, la dégradation des plastiques génère des pores et des micropores. La surface spécifique de la matière augmente donc, de même que le potentiel d'adsorption de molécules. Si le milieu est pollué, les toxines présentes se fixe sur les surfaces plastiques. Il peut donc y avoir une accumulation d'espèces toxiques sur les plastiques en lien avec leur dégradation. Un principe de précaution devrait s'appliquer (cf CR LEESU).

Dans le milieu aquatique, deux phénomènes contradictoires ont donc avoir lieu : le lessivage des plastiques et l'adsorption par les plastiques des polluants présents dans le milieu (effet éponge). La nature de la contamination des plastiques évolue donc en fonction du milieu.

Ces phénomènes dépendant de la nature du plastique, du comportement des habitants du territoire, des conditions météorologiques, du climat (ensoleillement notamment) et de la topographie du milieu. Il n'existe donc pas de modèle abouti permettant de prédire le comportement des plastiques en milieu aquatique et marin qui puisse être décliné à une échelle locale.

3. Quels sont les principaux impacts des pollutions plastiques sur les écosystèmes marins ?

L'impact du plastique sur les milieux ne fait pas consensus dans la communauté scientifique du fait principalement d'une caractérisation encore incomplète. Au cours des entretiens avec les acteurs du milieu, les phénomènes suivants ont été décrits :

- **Le transport d'espèces** : le plastique en milieu aquatique est rapidement recouvert d'une couche de lipides et de sucres appelé éco-corona. Cet espace sert d'habitat pour un grand nombre d'espèces vivantes (algues, bactéries, virus ...) (cf CR LEMAR). Le transport du plastique par les courants aquatiques et marins va permettre le déplacement de ces espèces de manière accélérée ou du moins anormale par rapport aux vitesses et rayons de déplacement habituel desdites espèces (cf CR IFREMER). La pollution plastique augmente donc le risque d'implantation dans les écosystèmes marins et terrestres d'espèces invasives.
- **Le transport de toxines** : La dégradation des plastiques a pour conséquence l'augmentation de la surface spécifique de la matière par la création de pores. Les polluants présents dans le milieu se fixent ainsi par adsorption dans ces pores. La thèse de Bettie Cormier (2020) a montré que les micro plastiques ont la capacité d'être des vecteurs de polluants. En revanche, il est également montré que la désorption de ces polluants en mer génère un impact non-significatif par rapport aux autres biais de contamination du milieu. Ainsi, les émissions dans le milieu doivent être mises en perspectives par rapport aux autres sources de pollution (eaux usées par exemple (cf CR MIO).
- **La bioaccumulation dans la chaîne alimentaire** : Le devenir des plastiques dans la chaîne alimentaire n'est pas clairement compris. Certains chercheurs retrouvent des micro plastiques dans la chair des mollusques et des petits poissons. Il pourrait y avoir une accumulation, au moins dans les premiers maillons de la chaîne alimentaire (Cf CR MEDIMEER). Un des objectifs du projet DECLIC, par exemple, est de caractériser la présence de micro plastiques dans les huitres.

Les plastiques se dégradent également en condition digestives. Ils libèrent des espèces chimiques, notamment celles utilisées comme additifs (phtalates, phénols, organo-phosphorés, perfluorés...). Ces molécules s'accumulent dans la chaîne alimentaire. La bioaccumulation des plastiques dans la chaîne alimentaire doit donc être vue à l'échelle de la fibre et de la molécule. (cf CR LEMAR).

Le débat sur la caractérisation de l'impact des pollutions plastiques sur les milieux est en cours. On peut toutefois affirmer que ces pollutions augmentent le risque de transport d'espèces invasives et exposent les animaux à des molécules toxiques contenues dans les plastiques et désorbés en conditions digestives. Ces impacts s'additionnent aux impacts spécifiques liés aux phénomènes d'accumulations dans les lagons ou les mangroves.

4. Quelles sont filières de traitements pour les plastiques aquatiques et marins ?

4.1. Collecte et qualification du gisement

D'un point de vue technique, le benchmark des solutions de collecte a montré qu'il existe diverses solutions de collectes, répondant toutes à des besoins spécifiques et donc à prioriser ou non suivant le contexte :

- Nécessité d'une collecte sélective ou possibilité de collecter en mélange (et avec de la biomasse) ;
- Collecte sur berges ou plage ;
- Collecte en cours d'eau, estuaire, littoral ou en pleine mer.

D'un point de vue économique, l'étude réalisée en phase 3 montre que c'est bel et bien le coût associé à la collecte qui représente la plus grosse contribution au coût de traitement global. Il est donc crucial autant que faire se peut de chercher à diminuer les coûts :

- Mutualisation de la collecte des déchets avec l'activité de pêche ;
- Appels à des bénévoles ;
- Mise en place de filières à dimension sociale (structures de réinsertion par exemple).

Au travers des entretiens réalisés, le retour terrain met en évidence que la valorisation des plastiques aquatiques et marins est complexe. Le gisement est hétérogène et difficilement prédictible. La ville de Nice, par exemple caractérise les déchets résiduels dans l'espace public après nettoyage. L'incertitude observée sur les plastiques est de +/- 150 % et de +/- 85 % pour les mégots de cigarette par exemple. Le dimensionnement d'une filière de valorisation sur un gisement imprédictible est très compliqué (cf CR Ville de Nice), d'où l'importance d'une bonne caractérisation amont (étalée dans le temps pour essayer de maîtriser les variations).

Sur le bassin de la Seine, on estime que 0.02% du plastique consommé par les habitants est rejeté dans les milieux aquatiques et marin. Si tout ce plastique était collecté pour être valorisé, il semblerait cohérent de le mutualiser avec les autres déchets plastiques du territoire pour densifier le flux et réduire son hétérogénéité. La mutualisation des plastiques aquatiques et marins avec d'autres filières du territoire semble en effet cohérente (cf CR LEESU). A ce jour, la majorité des collecteurs traitent les plastiques collectés avec les ordures ménagères résiduelles. Ce constat rejoint les conclusions obtenues lors de l'analyse technico-économique réalisée en phase 3.

4.2. Recyclage mécanique

Sur des résines spécifiques (PE, PET, PP), il existe quelques expériences industrielles pour le recyclage mécanique des plastiques collectés en mer de manière isolée. Par exemple, les résines PET et PA peuvent être recyclées en fils, ou utilisés en mix plastiques pour la production de plaques ou des matériaux. Les recycleurs contactés expriment à quel point il est difficile et coûteux d'avoir un gisement homogène, propre et mécaniquement utilisable avec des déchets *exclusivement* marins. C'est également la conclusion de l'analyse économique réalisée en phase 3, pour le traitement d'un

petit gisement via une filière batch low-tech de recyclage mécanique. L'analyse montre que le coût de production des granulés de plastique recyclé n'est pas en phase avec les prix marché et qu'il est difficile de rentabiliser de telles filières.

La grande majorité de ces acteurs mélange les plastiques marins avec d'autres gisements. C'est dans ces conditions uniquement que le recyclage matière est possible techniquement et économiquement. En conservant la part de déchets plastiques issus des milieux aquatiques et marins sous un certain seuil dans les filières de recyclage mécanique des plastiques issus des déchets ménagers, leur taux de souillure et de dégradation ne semble pas poser de problème technique pour le recyclage. En revanche cette intégration représente un coût (tri, lavage) qu'il convient de mettre en perspective de la nécessité à recycler mécaniquement ces plastiques marins et aquatiques. Dans tous les cas, la mutualisation, au-delà de permettre d'homogénéiser la composition du gisement, est également un levier de rentabilité économique pour ces filières.

Enfin, la cohérence environnementale du recyclage doit être questionnée au regard de l'ensemble du cycle de vie. Certains produits recyclés vont diffuser des micro plastiques dans l'environnement. Par exemple, les tissus sont émetteurs de microfibrilles plastiques qui sont émises dans l'environnement lors de leur utilisation. Une Analyse de Cycle de Vie pourrait conclure en faveur du traitement (cf CR LEESU).

4.3. Valorisation énergétique

L'étude réalisée en phase 3 montre que la valorisation énergétique d'un petit gisement de plastiques marins et aquatiques (500 t/an) est possible techniquement, puisque des modules de pyrolyse sont disponibles à cette échelle. En revanche, la collecte de ces déchets représente un coût trop important et l'étude économique montre, suivant les hypothèses définies, que la filière présente un coût de traitement à la tonne de déchets assez élevé. De même, le coût de production du diesel n'est pas compétitif avec les coûts du marché. Certains leviers, comme une redevance déchets par exemple, pourraient tout de même être envisagés.

A plus grande échelle (3 000 t/an par exemple), le coût de traitement des déchets calculé est très encourageant pour le développement de telles filières. Il en ressort également des coûts de production du diesel bien au-dessous des prix marchés. Il semble donc, dans des territoires où une réflexion est en cours sur le développement d'unités de valorisation énergétique de déchets plastiques terrestre, pertinent d'étudier l'intégration de plastiques aquatiques et marins pour mutualisation.

Cette étude présente l'analyse d'une unité de pyrolyse pour la production de diesel, mais une variété de business model est disponible :

- Pyrolyse pour la production d'électricité (déchets plastique ou biomasse) et de chaleur
- Production de CSR (plastiques et biomasse) pour gazéification et production :
 - D'électricité et de chaleur
 - Ou de méthane de synthèse
 - Ou d'hydrogène

- Incinération pour la production de chaleur et/ou d'électricité
- Etc.

La valorisation matière par recyclage mécanique des plastiques collectés en milieux marin et aquatique est complexe. Sa valeur ajoutée environnementale est incertaine. Un principe de précaution sur les aspects écotoxicologiques et formation de microplastique doit s'appliquer dans de nombreux cas. Les différents retours d'expérience montrent que le risque est maîtrisé pour l'incorporation de 10 % à 20 % de déchets marins dans des filières de recyclage de mix plastiques, ce qui rejoint un constat plutôt d'ordre économique sur la mutualisation de ce gisement avec les flux terrestres.

La valorisation énergétique via des procédés thermo-chimiques peut techniquement être applicable-aux plastiques collectés en milieux aquatique et marin, malgré la qualité et la quantité du gisement qui sont difficiles à prévoir, puisqu'il existe des technologies à très petite échelle, fonctionnant en batch et plutôt low-tech. D'un point de vue économique cependant, ces technologies sont plus adaptées à des gisement un peu plus importants (à partir de 3 000 t/an) dans un contexte de mutualisation avec des flux terrestres pour grossir le gisement incluant certains DIB ou les refus de la collecte sélective (plastique, bois, biomasse...).

Il semble que l'effort collectif devrait être concentré sur la lutte contre les émissions plastiques plutôt que sur la valorisation matière. Néanmoins, une fois collectés, les déchets marins et aquatiques peuvent être mutualisés avec d'autres filières locales, mais il est délicat de formuler des recommandations générales puisque c'est le contexte qui permet de valider ou non la pertinence économique de recycler mécaniquement une partie du flux ou de tout valoriser en procédé thermo-chimique.

5. En résumé, qu'est-ce qu'il faut faire ?

Selon la majorité des experts consultés, une fois que le plastique est dans l'eau, il n'y a plus de solution satisfaisante pour limiter son impact et protéger les milieux naturels. Les solutions de collecte ne peuvent capter qu'une petite fraction du plastique déversé dans le milieu. De plus, la quantité de plastique rejetée en mer est une partie infime de la consommation globale (cf CR Ville de Nice et LEESU). Réduire encore ce ratio semble très coûteux. Selon les acteurs consultés, la responsabilisation du consommateur n'apportera pas d'amélioration significative. La seule solution permettant de réduire les rejets de plastiques en mer est de réduire son utilisation. La consommation de plastique croît de manière exponentielle. Seule la réduction de la consommation permettra de réduire les émissions de plastique en mer.

En parallèle, pour remédier les plastiques déjà présents dans les milieux aquatiques et marins, la priorité doit être mise sur les actions de prévention. Les idées suivantes ont été proposées :

- Des campagnes de collecte ciblées sur certaines activités de certains territoires (pêche artisanale en Martinique par exemple – cf CR Entreprises et Environnement).
- La remédiation des « points noirs » en commençant par ceux des cours d'eau (cf CR Tara)
- Le nettoyage des berges de rivières et la prévention des lessivages (cf CR Ville de Nice)

Le plastique collecté est soit pollué soit dégradé. Pour être recyclé mécaniquement, il doit être trié et nettoyé. Ces étapes, sont souvent rédhibitoires. De plus, les produits issus des plastiques collectés en milieux marins et aquatiques doivent répondre à deux enjeux techniques :

- Respecter un principe de précaution. La composition chimique des plastiques n'est pas maîtrisée.
- Eviter de générer des microplastiques

Les produits extrudés n'ont pas de norme permettant de répondre au principe de précaution. La filière textile répond au principe de précaution avec la norme Oeko-Tex mais est probablement créatrice de microplastiques.

Aujourd'hui, la majorité des plastiques collectés en milieu aquatique ou marin est donc traités avec les ordures ménagères pour de la valorisation énergétique. Cette filière semble cohérente à la majorité des acteurs.

Pour protéger les milieux, les actions de valorisation ne sont pas prioritaires. Les actions de prévention des rejets doivent être privilégiées.

Les actions de recyclage doivent respecter le principe de précaution et ne pas émettre de microplastiques. Sans caractérisation plus poussée des effets de pollution, le principe de précaution pousse plutôt à la valorisation énergétique de ces flux, mutualisée aux gisements terrestres.

6. Focus sur les initiatives en DROM-COM

La publication Meijer et al. (Avril 2021) a montré le degré de contribution des rivières urbaines à la pollution plastique. Les habitants des territoires ultramarins sont essentiellement des littoraux. Dès lors, les villes DROM-COM peuvent être considérées comme des lieux sensibles pour la gestion des plastiques.

Si on observe les initiatives proposées par les ONG, les associations, les professionnels, les collectivités ou les organismes de recherches portant sur la lutte contre la pollution plastique en milieu marin dans les DROM-COM, on constate que très peu de ces initiatives portent sur la problématique du traitement. La majorité des actions portent sur de la sensibilisation/prévention, de la collecte ou du monitoring.

Les acteurs de terrain dans les DROM-COM cherchent à collecter les déchets sauvages pour réduire l'impact des activités humaines sur les animaux sauvages et pour maintenir la valeur scénique du territoire. De fait, les déchets plastiques ne sont qu'une partie du problème. Lors de l'opération « pays propre » en Martinique, par exemple, la ferraille ou les D3E sont également des gisements très importants (cf : CR Entreprises et Environnement). Dans un contexte plutôt de protection des milieux naturels, les acteurs contactés estiment que les enjeux prioritaires pour ces territoires sont l'assainissement et la lutte contre les pollutions agricoles.

Tous les territoires français sont équipés d'une filière de collecte sélective des déchets en vue de leur recyclage. Les OM résiduelles sont également traitées. Les acteurs de terrain interrogés disent avoir envisagé un partenariat avec le centre de tri local pour le recyclage des emballages collectés. Cette filière n'était pas possible à cause :

- Du manque de maîtrise du niveau de dégradation des plastiques
- Du tri nécessaire lors des opérations de collecte
- De l'effort prioritaire à mettre sur les opérations de collecte.

Les pollutions en macroplastiques ont toutefois un impact scénique, social et économique important. Elles peuvent être générées par une mauvaise gestion des ordures ménagères, comme à Mayotte (cf CR Merterre), par le dépôt direct dans les cours d'eau (lors de pique-niques par exemple), par la perte lors d'activités économiques (pêche, tourisme, etc.).

Lors des entretiens avec les acteurs locaux, les actions prioritaires mentionnées pour lutter contre les pollutions plastiques en mer ont été :

- Le monitoring zéro déchets
- La remédiation des décharges historiques et des décharges agricoles
- L'équipement des cours d'eau urbains de dégrilleurs
- Les opérations nettoyages de berges et de littoral (opération médiatisées)
- Les actions de prévention vers les acteurs économiques (sans oublier les économies parallèles)

Comme l'analyse économique l'a montré, le plus pertinent est de concentrer l'effort sur la prévention et la collecte, ainsi que sur la valorisation en flux mutualisé avec le gisement terrestre. Les plastiques collectés peuvent intégrer des filières de valorisation développées sur le territoire (mutualisation des flux) ou être traités avec les ordures ménagères. En effet, l'analyse économique a montré que, pour un gisement plastiques marins et aquatique mutualisé avec les gisements terrestres, des solutions de traitement locales peuvent être développées (ici par pyrolyse). D'autres méritent également d'être étudiées (incinération et gazéification via la production de CSR) en fonction du contexte.

Annexes

1. Experts et ressources

1.1. Personnes interviewées

Structure	Contact	Site internet
APNEE	Laetitia Olivieri	www.apneeswimwear.com
Associaton Environnement	Entreprise et Marie Buisson Dominique Augier	www.entreprisesenvironnement.com
CECI/CERFACS	Boris Dewitte	www.cerfacs.fr
CLS	Marc Lucas	www.groupcls.com
Direction de la propreté – Ville de Nice	Laurent Calatayud	www.nicecontedazur.com
FIL&FAB	Georges Canal	www.fil-et-fab.fr
Fondation Tara Océan	Henri Bourgeois Costa	www.fondationtaraocean.org
IFREMER	François Galgani	www.ifremer.fr
Laboratoire MIO	Richard Sempere	www.mio.osupytheas.fr
LEESU / Université Paris Est	Romain Tramoy Johnny Gasperi	www.leesu.fr
LEMAR / Université de Brest	Ika Paul-Pont	www.univ-brest.fr/lemar/le-labo/
MerTerre	Isabelle Poitou	www.mer-terre.org
OREME / Université de Montpellier	Sebastien Mas Delphine Bonnet	www.umontpellier.fr
Plastic Europe	Jean Yves Daclin	www.plasticseurope.org
QUALYSE / Université de La Rochelle	Arno Bringer	www.qualyse.fr
Recnorec	Maxime Jacob	www.recnorec.com
Reseaclons	Xavier Murard	www.reseaclons.org
Teo La Rochelle	Fabrice Faure	www.teolarochelle.org
The Sea Cleaners	Éric Le Plomb Gwenaëlle Coat	www.theseacleaners.org

1.2. Autres personnes ressources (non consultées)

1.2.1. *Communauté scientifique*

Laboratoire Microorganismes : Génome Environnement (LMGE)	Boris EYHERAGUIBEL
Institut des Molécules et Matériaux du Mans (IMMM)	Fabienne Lagarde
Laboratoire Charles Coulomb (L2C), Montpellier	Pascale Fabre,
Laboratoire d'Océanographie Microbienne (LOMIC)	Jean-François GHIGLIONE,
Laboratoire des Interactions moléculaires et de la réactivité chimique et photochimique (IMRCP)	Alexandra ter-Halle
Institut de recherche pour le développement (IRD)	Christophe Maes
CEREMA	Pierre Yves Bellon
Université Bretagne Sud Licence Polymères et Composites	Stéphane BRUZAUD
INRAE	Nathalie Gontard
IMT Atlantique	Rene Garelo

1.2.2. *Acteurs terrain*

Gestes propres	Carole Carpentier
SeaBin Project	Peter Ceglinski
Association EXOCET	Anne PETERMANN
Recyclop / Almeida	Abdes Bengorine
MeGO !	Bastien Lucas
We Waste	Anne Belot
Plastic@Sea	Anne-Leila Meistertzheim
Surf Riders	Antoine Bruge
AREBio	Audrey Pelt

1.2.3. *Utilisateurs*

EcoAlf	Javier Goyeneche
Seaqual	Anna Bozzano
Les Sirènes	Priscille Gantenbein

2. Liste de références

2.1. Publications

- Bettie Cormier. Microplastic toxicity for fish : beyond simple vectors for pollutants?. Ecotoxicology. Université de Bordeaux, 2020. English. NNT : 2020BORD0036
- Jinfeng Ding, Chengjun Sun, Changfei He, Jingxi Li Peng Ju, Fengmin Li; ,Microplastics in four bivalve species and basis for using bivalves as bioindicators of microplastic pollution; Institute of Marine Science and Technology, Shandong University; 2021
- Vincent Fauvelle, Marc Garel, Christian Tamburini, David Nerini, Javier Castro-Jiménez, Natascha Schmidt, Andrea Paluselli, Armand Fahs, Laure Papillon, Andy M. Booth & Richard Sempéré. Organic additive release from plastic to seawater is lower under deep-sea conditions. Nature Communications, 2021
- L. Frère, I. Paul-Pont, E. Rinnert b, S. Petton, J. Jaffré, I. Bihannic, P. Soudant, C. Lambert, A. Huvet; Influence of environmental and anthropogenic factors on the composition, concentration and spatial distribution of microplastics: A case study of the Bay of Brest (Brittany, France); 2017
- Tony Gardon, Maria El Rakwe, Ika Paul-Pont, Jeremy Le Luyer, Lena Thomas, Enora Prado, Kada Boukerma, Anne-Laure Cassone, Virgile Quillien, Claude Soyez, Louis Costes, Margaux Crusot, Catherine Dreanno, Gilles Le Moullac, Arnaud Huvet; Microplastics contamination in pearl-farming lagoons of French Polynesia; 2021
- Simon Jan van Gennip, Boris Dewitte, Véronique Garçon, Martin Thiel, Ekaterina Popova, Yann Drillet, Marcel Ramos, Beatriz Yannicelli, Luis Bravo, Nicolas Ory, Guillermo Luna-Jorquera & Carlos F. Gaymer. In search for the sources of plastic marine litter that contaminates the Easter Island Ecoregion. Scientific Reports. 2019
- Albert A. Koelmans, Adil Bakir, G. Allen Burton, Colin R. Janssen; Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies; 2016
- Laurent C.M. Lebreton, Joost van der Zwet, Jan-Willem Damsteeg, Boyan Slat, Anthony Andrady & Julia Reisser. River plastic emissions to the world's oceans. Nature Communication. 2017.
- Charlotte Lefebvre, Claire Saraux, Olivier Heitz, Antoine Nowaczyk, Delphine Bonnet; Microplastics FTIR characterisation and distribution in the water column and digestive tracts of small pelagic fish in the Gulf of Lions ; MARBEC, Université de Montpellier, Ifremer, IRD, CNRS, 2019
- Elise Leonard, Marc Lucas, Identifying plastic accumulation zones in coastal seas: The Roatan Island case study, Marine Pollution, 2020
- Rainer Lohmann. Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans—but should microplastics be considered POPs themselves? 2017.

- C. Maes, N. Grima, B. Blanke, E. Martinez, T. Paviet-Salomon, and T. Huck. A surface “super-convergence” pathway connecting the South Indian Ocean to the subtropical South Pacific gyre, 2018
- Caroline Marek, Florian Parisot, Marine Guyomard, Marie-Amélie Marcoux, Marius Rondel, et al. Lutte contre la pollution plastique en milieu marin. Etat des lieux, réglementation, recensement et analyse des initiatives. [Contrat] ADEME; ECOGEOS; LEESU. 2020.
- Lourens J. J. Meijer, Tim van Emmerik, Ruud van der Ent, Christian Schmidt, Laurent Lebreton More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. 2021.
- Andrea Paluselli, Vincent Fauvelle, François Galgani, and Richard Sempéré. Phthalate Release from Plastic Fragments and Degradation in Seawater. Env. Sci. Technol., 2019

2.2. Rapport et autres communications

- CITEO - Étude relative à l'élaboration d'un état des lieux partagé des connaissances sur la thématique des déchets sauvages diffus -2021
- ADEME Réunion - Mayotte. Mission d'Assistance à la caractérisation et la définition de l'impact des macro-déchets sur le milieu aquatique (eaux douces et marines) : état des lieux et recommandations. 2011
- ADEME, ECOGEOS. Caractérisation de la problématique des déchets sauvages. Rapport. 2019
- Agung Dhamar Syakti, Maxime Jacob, Timothee Birrien, Pierre Doumenq, Guy Louarn ; Plastic Debris Apportionment on Bintal Coastal Area, Indonesia; Marine Pollution Bulletin Baseline
- ASSO-MER - Eco-responsabilité des activités de tourisme en mer. 2021
- CLS – Plastic solutions, 2021
- Minderoo Foundation - The Plastic Waste Makers Index - 2021
- Ministère de la Transition écologique et solidaire; Plan d'actions "Zéro déchet plastique en mer". 2020-2025
- OREME - Description DECLIC 2021
- Plastics Europe - Plastics - the facts 2019 - An analysis of European plastics production, demand and waste data.
- Reconorec - Maxime Jacob – Etude de recyclabilité – Mai 2021
- Reconorec Présentation
- République Française - Les déchets solides en mer et sur le littoral. 2019
- ReSEAclons - dossier de presse
- TEO La Rochelle - Bac à marée – Bilan sur les trois premières campagnes de collectage. 2021
- TEO La Rochelle - Bac à marée – Résultats par agglomération et communes. 2018-2021.
- WWF - Pollution Plastique : A qui la faute ? Identification des défaillances systémiques et présentation du scénario zéro plastique dans la nature en 2030 - 2019