Interreg

Cofinanziato dall'Unione europea
Cofinancé par l'Union européenne

Marittimo–IT FR–Maritime

plastr⛵n

Rapport sur les équipements commerciaux présentant des caractéristiques adaptées aux besoins du projet

28/04/2025

Le projet PLASTRON est cofinancé par le programme Interreg Italie-France Maritime 2021-2027, avec un financement de 1 467 718,82 € (FEDER) --> dont 80 % correspondent à la part de financement du FEDER

Le projet Plastron est cofinancé par le programme Interreg Italie-France Maritime 2021-2027, avec un financement de 1 467 718,82 € (FEDER) → dont 80 % correspondent à la part de financement FEDER

Auteurs

Nom	Institution	Contact
Irene Mari	Cispel	
Stefano Becherini	Cispel-Revet	
Marco Paci	Cispel-Revet	
Mattia Frascio	UniGe	
Alessandro Seitone	UniGe	

Réviseur

Nom	Institution	Contact
Chiara Mandolfino	UniGe	
Laura Bartolommei	Cispel-Revet	
Vittorio Belotti	UniGe	
Maila Castellano	UniGe	
Dario Cavallo	UniGe	

Acronyme du projet	Plastron
Titre du projet	Réutilisation du plastique issu de la mer grâce à la fabrication additive : une stratégie pour relever les défis des filières touristiques et renforcer la résilience des entreprises
N° de la convention N° de la convention	
CUP	CUP D37G23000380006
Programme	Interreg Maritime
Axe prioritaire	Une zone transfrontalière résiliente et efficace en termes de ressources
Objectif spécifique	Promouvoir la transition vers une économie circulaire et efficace dans l'utilisation des ressources
Date de début du projet	01/03/2024
Durée	36
N° de produit	1.3.1
Nom du document	Rapport sur les équipements commerciaux présentant des caractéristiques adaptées aux besoins du projet
Révision n° du (date) Numéro de révision du (date)	
Composant	
Date de soumission du produit par Projet approuvé Date de soumission du produit par Projet approuvé	
Date de soumission effective Date de soumission effective	
Auteur principal	
Institution	
E-mail	
Résumé	
Mots-clés	

Résumé

Le document suivant décrit les activités menées pour évaluer les équipements et les solutions techniques les plus adaptés à la valorisation des plastiques à kilomètre zéro, en accordant une attention particulière aux matériaux polyoléfiniques (PP-PE) et au PET, les plus couramment présents dans les flux de déchets analysés. Après une étude préalable des flux de déchets locaux et des types de plastiques, une technologie de valorisation mécanique a été sélectionnée pour son efficacité dans le traitement de grands volumes. Un état de l'art des équipements compatibles a donc été rédigé et une évaluation des installations d'une capacité allant jusqu'à 200 kg/h a été lancée. Parallèlement, une ligne expérimentale à petite échelle (10 kg/h) a été définie pour le développement et l'expérimentation des matériaux du projet. Malgré les progrès réalisés dans la sélection et l'achat des équipements pour la ligne de recherche, certains équipements restent à acquérir, achats qui seront effectués au cours du mois prochain. En outre, certains aspects fondamentaux doivent encore être approfondis, tels que la conception des systèmes de transport et de stockage au sein de l'installation réelle, le traitement des eaux usées et la planification énergétique. Enfin, l'estimation initiale des flux de déchets nécessite une validation ultérieure par cartographie sur le terrain. Les activités menées jusqu'à présent constituent une base solide pour les phases suivantes du projet et contribuent à la viabilité technique et économique du système de valorisation.

Résumé

Ce document décrit les activités réalisées pour l'évaluation des équipements et des solutions techniques les plus adaptés à la valorisation des plastiques en circuit court, avec une attention particulière portée aux matériaux polyoléfiniques (PP-PE) et au PET, qui sont les plus couramment présents dans les flux de déchets analysés. Après une étude préliminaire des flux de déchets locaux et des types de plastiques, une technologie de recyclage mécanique a été sélectionnée pour son efficacité dans le traitement de grands volumes. Un état de l'art des équipements compatibles a ainsi été rédigé et une évaluation des installations d'une capacité allant jusqu'à 200 kg/h a été lancée. Parallèlement, une ligne expérimentale à petite échelle (10 kg/h) a été définie pour le développement et l'expérimentation des matériaux du projet. Malgré les avancées dans la sélection et l'acquisition des équipements pour la ligne de recherche, certains matériels restent à acquérir, achats qui seront effectués dans le mois à venir. De plus, certains aspects essentiels doivent encore être approfondis, notamment la conception des systèmes internes de transport et de stockage des matériaux dans l'installation réelle, le traitement des eaux usées issues du processus et la planification énergétique. Enfin, l'estimation initiale des flux de déchets devra être validée par une cartographie de terrain. Les activités menées jusqu'à présent constituent une base solide pour les prochaines étapes du projet et contribuent à la durabilité technique et économique du système de valorisation.

Table des matières

Rapport sur les équipements commerciaux présentant des caractéristiques adaptées aux besoins du projet I

Sommaire IV

Résumé V

1. Introduction 10

2. Contexte d'application 13

3. État des lieux du recyclage mécanique des plastiques post-consommation 18

3.1. Zone de préparation des matières plastiques post-consommation présélectionnées 19

3.1.1 Broyage 19

3.1.2. Broyage 21

3.1.3. Séparation 24

3.1.4. Nettoyage et lavage 25

3.1.5. Séchage, dessiccation, déshumidification 27

3.2. Zone de retraitement ou de reprocessing 31

3.2.1. Densificateur 32

3.2.2. Extrudeuse monovis 33

3.2.3. Extrudeuse à double vis 34

3.2.4. Filtration 35

3.2.5. Granulation (humide, sèche) 36

4. Installation prototype d'expérimentation PLASTRON 39

4.1. Séparation 41

4.2. Réduction de la granulométrie du matériau 44

4.3. Lavage et séchage après broyage 45

4.4. Séchage et déshumidification 49

4.5. Gestion des eaux usées et approvisionnement énergétique 50

4.6. Compoundage et granulation 51

4.7. Évaluation des matériaux : processus d'utilisation des granulés.....53

5. Conclusions.....54

Bibliographie.....55

Index des figures

Figure 1 - Analyses de COREPLA sur les documents de PlasticsEurope : The Circular Economy for Plastics. 15
Figure 2 - Tonnes de déchets d'emballages de la région d'Ile Rousse Balagne....16
Figure 3 – Ligne de préparation Lindner [25]....19
Figure 4 – Schéma des éléments fonctionnels, broyeur Untha [26]....20
Figure 5 a) Quatre arbres équipés de couteaux à disque en alliage d'acier résistant à l'usure b) Arbre unique à lames rapportées, généralement frittées c) Grille à mailles serrées d) Arbre unique à lames rapportées et grille à mailles larges....21
Figure 6 a) Chambre super-tangentielle b) Chambre tangentielle c) Chambre tangentielle 22
Figure 7- a) Coupe du rotor ouvert b) Coupe du rotor décalé [29] 23
Figure 8 – Broyeur à couteaux à rotor décalé en deux versions techniques [30], [31] 23
Figure 9 – Broyeur à rotor ouvert, à couteaux droits avec deux angles de coupe différents [32], [33] 24
Figure 10 - Cuve de flottation Tecnofer [34] 25
Figure 11 - Laveuse horizontale Tecnofer [34]....26
Figure 12 – Laveuse verticale Sikoplast [38]....27
Figure 13 – Centrifugeuse verticale Filtec [36] 28
Figure 14 – Centrifugeuse horizontale Filtec [41] 28
Figure 15 - Presse à vis Tecnofer [34]....29
Figure 16 – Séchoir à air chaud de petite taille, Moretto 30
Figure 17 – Exemple de ligne de granulation à sec sans densificateur 32
Figure 18 – Schéma d'un densificateur 32
Figure 19 – Densificateur Liontek Tecnova [45]....33
Figure 20 – Image d'une extrudeuse Mariscorp [46] et schéma d'une extrudeuse monovis 34
Figure 21 – Détail des vis à l'intérieur des cylindres chauffés d'une extrudeuse à double vis. 34
Figure 22 – Filtre avec système de changement automatique de filtre Break Machinery [47] 35
Figure 23 – Flux de matière dans un système de filtration en continu....36
Figure 24 – Granulateur/pelletiseur à air de Baracco. [41] 37
Figure 25 – Système de granulation sous-marine de Filtec. [36]....37
Figure 26 – Étapes opérationnelles d'une installation à petite échelle 39
Figure 27 – Séquence hypothétique des opérations dans une installation expérimentale A) Broyeur B) Laveuse C) Séchoir D) Déshumidificateur E) Ligne de granulation à sec F) Imprimante 3D 41
Figure 28 – Conteneur en plastique 1200 x 1000 H 580, d'une capacité de 430 litres, montable sur roues et équipé d'un système de vidange....42
Figure 29 – Schéma récapitulatif du flux de travail 43
Figure 30 - Lave-légumes Electrolux LVA 100 46
Figure 31 - Dimensions et caractéristiques techniques de l'Electrolux LVA 100 47
Figure 32 - Four Argolab 50....48
Figure 33 – Déshumidificateur New Omap WDC.E15 MT-30....49
Figure 34 - Eur.ex.ma X-TWIN S - 40 D [50]....51
Figure 35 - Ligne de granulation Eur.Ex. Ma 52

Index des tableaux

Tableau 1 – Données sur le tri sélectif du plastique dans la commune de Stintino pour la période 2023-2024.....14
Tableau 2 - Données relatives au large d'Ile-Rousse, été 2014.....16
Tableau 3 – Offres de broyeurs.....45
Tableau 4 - Devis pour la machine à laver.....47
Tableau 5 - Offres de déshumidificateurs.....49

1. Introduction

L'utilisation des matériaux polymères ne cesse de croître : de 2 millions de tonnes produites dans le monde en 1960, on est passé à 460 millions de tonnes en 2014, avec des prévisions de croissance pouvant atteindre 1,23 milliard de tonnes d'ici 2060. La production a doublé au cours des 20 dernières années.
À l'échelle mondiale, sur le plastique produit, utilisé puis devenu déchet, 19 % ont été incinérés, près de 50 % ont été mis en décharge contrôlée, tandis que 22 % ont été éliminés via des décharges non réglementées, brûlés dans des fosses à ciel ouvert ou dispersés dans l'environnement. Après prise en compte des pertes liées au processus de recyclage, seuls 9 % des déchets plastiques ont été effectivement recyclés [1], [2]. En Europe, en revanche, en 2014, sur les déchets plastiques post-consommation produits, 29,7 % ont été effectivement recyclés, 39,5 % ont été envoyés vers la valorisation énergétique et les 30,8 % restants ont été mis en décharge [3].
De nombreuses études ont démontré qu'une part importante des déchets plastiques dispersés sur la terre ferme finit par atteindre la mer. On estime actuellement que plus de 731 tonnes de plastique se déversent chaque jour dans la mer Méditerranée.
Selon le Programme des Nations Unies pour l'environnement [4], les déchets marins (marine litter) comprennent tout matériau solide rejeté, fabriqué ou transformé, éliminé ou abandonné dans le milieu marin ou côtier [5]. Les sources de déchets marins peuvent être classées en deux grandes catégories : terrestres et marines.
Les sources terrestres comprennent les décharges, la pollution des plages et des zones côtières due au tourisme [6], les rivières et les eaux de crue, les émissions industrielles et les rejets d'eaux usées non traitées [4]. Les sources marines, quant à elles, comprennent le transport maritime de marchandises et de passagers, la navigation de plaisance et militaire, les activités de pêche et d'aquaculture, l'industrie énergétique, ainsi que les rejets légaux et illégaux [7].
On estime que les sources terrestres contribuent à environ 80 % au problème des déchets marins [8]. Un rapport du WWF, axé sur la dispersion des plastiques le long des côtes et dans les mers italiennes, affirme que 78 % des déchets plastiques (soit 41 400 tonnes) proviennent d'activités menées dans les zones côtières et que, parmi les déchets marins, le plastique représente la fraction prédominante, avec une présence estimée entre 60 % et 90 % du total [9].
Les principales causes sont une gestion inefficace des déchets et un afflux touristique important. De plus, le rapport du WWF estime que sur les 12 600 tonnes de plastique rejetées par l'Italie en Méditerranée, une part significative revient sur nos côtes dans un délai d'un an, tandis que 2 % proviennent d'activités côtières d'autres pays [10].
Le bon état de l'écosystème marin est surveillé et protégé par *la directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin* » (directive 2008/56/CE du Parlement européen), qui promeut des mesures visant à atteindre et à maintenir le bon état écologique. Cette directive encourage non seulement la réduction du plastique à usage unique (qui représente environ 60 % des déchets marins), mais promeut également des actions de collecte, de tri et de catalogage des déchets.
Ce document présente un concept de gestion alternatif pour les déchets plastiques post-consommation dispersés dans l'environnement et provenant de la mer, en accordant une attention particulière aux localités touristiques insulaires dont les infrastructures sont insuffisantes. L'action des courants influence la répartition des déchets marins, provoquant une accumulation plus importante dans certaines zones côtières [6]. Les autorités locales chargées de la collecte doivent garantir une gestion correcte des déchets.
Selon la hiérarchie des déchets définie dans la directive européenne 2008/98, les stratégies de gestion appropriées pour les déchets plastiques devraient inclure le recyclage (mécanique et chimique) et la valorisation énergétique. Le recyclage mécanique utilise des techniques conventionnelles pour le traitement du plastique, tandis que le recyclage chimique décompose le matériau en restituant les monomères de départ. La valorisation énergétique, en revanche, détruit complètement le plastique par combustion.

Parmi ces options, le recyclage mécanique est le plus répandu et le plus souhaitable, car il permet de récupérer la valeur maximale contenue dans les déchets [11], [12]. En Italie, selon l'ASSORIMAP, le recyclage mécanique des déchets plastiques post-consommation a atteint environ 785 000 tonnes en 2023 [13]. Cependant, le recyclage

mécanique des déchets plastiques marins est encore peu pratiqué en raison de la faible qualité et de la dégradation des matériaux collectés [14].

Ce document analyse l'applicabilité d'un concept d'installation destiné au traitement et à la valorisation des flux de plastiques provenant à la fois des déchets marins et des déchets plastiques post-consommation non dispersés, générés dans les zones voisines de l'installation. Il s'agit donc d'un outil utile pour mettre en œuvre le paradigme du recyclage à km zéro, en transformant les déchets en matière première secondaire et, par conséquent, en ressource disponible sur place. Ce paradigme constitue une alternative aux systèmes actuels basés soit sur les décharges, soit sur la délocalisation du traitement des déchets.

L'application a été conçue pour les petites et moyennes collectivités dans le but de créer une économie locale résiliente, dotée d'outils permettant de relever les défis liés au tourisme de masse, à l'isolement insulaire et aux infrastructures. Dans ce contexte, deux communes situées dans la zone couverte par le programme, Stintino en Italie et L'Île-Rousse en France, ont été impliquées et retenues comme références pour les activités pilotes. Le recyclage retenu est de type mécanique (voir chap. 3), sur la base d'expériences antérieures financées par les programmes de l'Union européenne et en particulier par l'initiative Precious Plastic. Ce projet open source, conçu par le designer néerlandais Dave Hakkens en 2013 à la suite d'un financement de l'Union européenne, représente une « communauté mondiale » qui promeut la création de petites installations de recyclage du plastique. Le projet couvre l'ensemble du processus, de la collecte des matériaux à la production et à la vente de nouveaux produits, en suivant les principes du design durable. [15] Les résultats démontrant qu'il est possible de concevoir des installations simplifiées présentant des avantages en termes de coûts et de compétences nécessaires à leur exploitation sont particulièrement intéressants, car ils rendent la technologie du recyclage et de la réutilisation du plastique accessible en dehors des grands centres actuellement utilisés. Le système de recyclage proposé par le projet Precious Plastic repose sur quatre machines fondamentales : un broyeur, une extrudeuse, une presse à injection et une presse à plat. Ces machines sont conçues pour un recyclage économique du plastique, avec une production variant entre 15 et 20 kg/h, et un coût d'environ
10 000 € pour l'extrudeuse. Le processus de fabrication permet de passer directement de la matière plastique broyée au produit fini, grâce à la création d'objets à l'aide de moules. Cette approche diffère considérablement des méthodes industrielles traditionnelles utilisées par les entreprises de recyclage, où le plastique à recycler est d'abord transformé en granulés, avant d'être ensuite traité par d'autres industries spécialisées par extrusion, moulage par injection ou fabrication additive.
Le système Precious Plastic se distingue par son faible coût, rendu possible par la simplification des machines et la réduction des contrôles en boucle fermée dans le processus. Cette approche permet une réduction significative des coûts, mais peut présenter des limites importantes en termes de qualité du produit final et d'adaptabilité du processus à différents besoins de production. En particulier, le risque de dégradation et de réticulation du plastique est plus élevé, et la production par moulage est limitée à des produits spécifiques, ce qui restreint les possibilités de personnalisation et de polyvalence. Le projet vise donc à faire évoluer l'approche présentée, initialement adaptée à un particulier, pour l'adapter à l'échelle d'une municipalité ou d'un regroupement de communes. Face à une augmentation limitée des coûts, l'objectif est d'apporter une ingénierie plus poussée au processus afin de garantir une matière première secondaire de qualité contrôlée et présentant un intérêt économique. Le but ultime est en effet de générer un cercle vertueux qui, à partir de la valeur économique du matériau et des produits finis, transforme les déchets plastiques en ressource et décourage ainsi leur dispersion ou leur élimination inappropriée.

Dans cette optique, l'impression 3D à granulés, alternative à celle à filament, représente une évolution technologique possible pour dépasser les limites imposées par le processus d'injection, peu flexible en termes de petites productions et donc peu intéressant pour les produits artisanaux, de design ou créés sur place pour réparer ou appliquer des logiques de refabrication. Cette technologie permet une plus grande polyvalence de production, en éliminant la nécessité de moules dédiés pour chaque produit. L'utilisation économiquement efficace de l'impression 3D à partir de granulés est liée en particulier à la qualité de la production des granulés.

La production de granulés nécessite un contrôle précis de la phase d'extrusion, afin d'éviter les phénomènes de dégradation thermique (tels que l'oxydation et la réduction) qui compromettraient les propriétés physico-

mécaniques du matériau. Le granulat obtenu doit présenter des caractéristiques d'usinabilité adéquates pour être utilisé efficacement dans les processus de fabrication additive FGF (Fused Granulate Fabrication), ou transformé en filament et utilisé dans les processus FFF/FDM (Fused Filament Fabrication/Fused Deposition Modeling), garantissant ainsi la qualité du produit fini.

Pour répondre à ces exigences, il est nécessaire d'utiliser des machines capables de fonctionner dans un régime contrôlé et reproductible qui, bien qu'impliquant un investissement initial plus important que celui de la philosophie Precious Plastic, permettent la production de granulés de qualité supérieure. Le matériau ainsi obtenu pourra donc être utilisé localement pour répondre aux besoins de production de proximité, ou être exporté vers d'autres entités, artisanales et industrielles, générant de nouvelles opportunités de marché. Cette possibilité dépend de la qualité du matériau, qui doit être comparable à celle des produits commerciaux.

Dans le cadre du projet PLASTRON, une évaluation du rapport entre les coûts d'investissement et les bénéfices est en cours. L'adoption de machines plus performantes comporte des avantages à moyen et long terme, tant en termes de qualité du produit que de flexibilité du processus. La production de granulés de haute qualité permet d'élargir les applications possibles et d'accéder à de nouveaux marchés.

Le présent travail porte sur l'identification de solutions techniques pour le recyclage de plastiques présentant des caractéristiques physico-chimiques similaires ou rendues telles par des additifs.

Des estimations ont été réalisées sur les quantités et les types de plastiques récupérables dans le but d'identifier les installations les mieux adaptées aux besoins des actions pilotes. Les prévisions, basées sur des données issues de la littérature, seront vérifiées par des activités sur le terrain au cours des saisons de collecte 2025 et 2026, dans le cadre des actions pilotes prévues par le projet.

Une étude de l'état de l'art et des machines actuellement disponibles sur le marché a été réalisée, avec une enquête visant à identifier les fabricants de machines compatibles avec les volumes estimés. Une configuration de machines a donc été identifiée qui, dans l'ensemble, peut être utilisée pour réaliser un prototype d'installation pour la phase d'expérimentation. Cette configuration a pour fonction d'évaluer concrètement les aspects critiques du prototype, tant sur le plan opérationnel que réglementaire. Ce prototype fournira ensuite les informations nécessaires aux prochaines études et aux expérimentations de mise à l'échelle.

2. Contexte d'application

L'objectif est d'étudier une installation prototype pour le recyclage des matériaux à kilométrage zéro. Par conséquent, cette évaluation préliminaire s'est appuyée sur les données relatives aux matériaux collectés dans les localités où se dérouleront les actions pilotes. En particulier, sur les données relatives aux déchets marins et à la fraction des déchets plastiques dans les communes de Stintino et d'Ile Rousse. Ces communes sont de petites localités côtières à forte vocation touristique saisonnière. De plus, comme il s'agit de localités insulaires, le transport des déchets représente un enjeu critique tant en termes de coûts que d'émissions de CO_2, ce qui rend encore plus pertinente l'adoption de solutions locales de traitement.
Il est utile de préciser quels sont les flux de matériaux valorisables afin d'en évaluer la quantité. Tous les plastiques ne peuvent pas être fondus et recyclés ensemble ; seuls les polymères de même type ou rendus compatibles grâce à des additifs spécifiques peuvent l'être. Dans un premier temps, il convient d'étudier des solutions pour les flux de matériaux les plus importants.
Le plastique récupéré à partir des déchets marins se présente sous forme de macro-déchets et de méso-déchets, c'est-à-dire des plastiques dont la taille est comprise entre 2,5 mm et 200 mm. Ces deux catégories de taille sont celles qui sont le plus souvent ramassées lors du nettoyage des côtes et des opérations de nettoyage menées par des bénévoles, car elles ne nécessitent pas d'équipements particuliers tels que des tamis.
Les mélanges de plastiques visés par l'étude seront composés d'un mélange de déchets plastiques marins et de déchets plastiques provenant des déchets urbains solides (DUS). Cela permettra d'obtenir des granulés de meilleure qualité que ceux issus uniquement des déchets marins (généralement dégradés par une exposition prolongée aux agents atmosphériques).
D'après une méta-analyse sur la distribution des polymères plastiques dans le milieu marin [16], qui a passé en revue les résultats de plus de 50 collectes, effectuées principalement en Europe, on trouve, parmi les matériaux les plus abondants dans les déchets plastiques marins avec le PET, le PE et le PP.
En ce qui concerne les déchets plastiques urbains en Italie, selon les données publiées par COREPLA, les polyoléfines et le PET figurent parmi les matériaux les plus fréquemment jetés par les ménages, comme c'est le cas en Europe [17].
Si l'on analyse en revanche les déchets collectés par PLASTRON dans 5 communes de la côte ligure au cours de la saison estivale 2024, sur près de 17 kg de déchets plastiques récupérés, triés et analysés, 20 % étaient composés de polyoléfines et de PET, 30 % de plastiques laminés ou de fragments difficilement séparables (donc un mélange de plastiques), 26 % de déchets non triés et le reste de plastiques mixtes d'un autre type.

En ce qui concerne la commune de Stintino, les données relatives à la collecte des déchets plastiques en mer ont été estimées sur la base de l'analyse des données disponibles dans la littérature. Pour la zone de Stintino, on a notamment pris en compte les données issues de la surveillance effectuée sur l'île d'Asinara. Ce choix a été motivé par la proximité immédiate avec les zones où les opérations seront menées, ainsi que par la nécessité d'obtenir des données préliminaires utiles pour estimer les volumes de matériaux traitables. Plus précisément, les informations ont été élaborées à partir de l'étude *« Distribution des déchets marins sur les plages de Sardaigne : le cas de Cala dei Ponzesi et de Cala Spalmatore sur l'île d'Asinara »* (DOI 10.36253/978-88-5518-147-1.20), qui a mené des prélèvements en mars, juillet et décembre 2019. L'étude la plus complète actuellement disponible sur les plages italiennes est celle menée en 2019 par Legambiente [18], qui fournit principalement des données sur les macro-plastiques, mettant en évidence l'ampleur et la propagation du problème des déchets de plage. Sur les 93 plages surveillées, on a recensé en moyenne 968 déchets par 100 mètres linéaires de plage, dont 81 % constitués de matières plastiques. L'analyse des collectes cartographiées en mars et juillet 2019 sur les deux plages de l'Asinara a mis en évidence une moyenne d'environ 1,79 g/m² de déchets plastiques. L'analyse du total des déchets est calculée en additionnant les pourcentages des 20 principales classes de produits de la catégorie des polymères artificiels selon le protocole DeFishGear.
Parmi ceux-ci, 63 % des produits classés sont composés de PET, PE, PP (catégories G9, 21, 22, 23, 24, 31, 78, 79, 80), le pourcentage restant correspondant à des mélanges de plastiques en proportions inférieures, bien que ce pourcentage puisse encore diminuer lors de la phase de tri. Pour une estimation préliminaire des volumes exploitables, on propose une évaluation prudente du plastique éligible au recyclage PLASTRON représentant au moins 40 % des déchets marins collectés, en tenant également compte d'un taux de rejet dû au processus de tri.

Enfin, il est important de souligner que les valeurs indiquées ci-dessus proviennent exclusivement de l'analyse des quantités collectées sur les plages et n'incluent pas les déchets présents sur le littoral ou sur les fonds marins, et que les prévisions de collecte ont donc pour but d'identifier un ordre de grandeur de la quantité que l'on s'attend à collecter.

D'après le rapport *« Détermination de la longueur du littoral balnéaire pour les communes côtières de Sardaigne »* de la région de Sardaigne, le littoral balnéaire de la commune de Stintino s'étend sur environ 56 km. en supposant une largeur de 20 mètres pour la zone concernée par l'échouage de déchets marins, nous pouvons estimer à environ 1 million de mètres carrés la superficie concernée par d'éventuelles accumulations de déchets marins pour la commune de Stintino et, d'après ce qui précède, estimer à 1 790 kg/an la quantité de plastique récupérable, dont 716 kg/an recyclables par l'installation sur place. En ce qui concerne le plastique récupéré à partir des déchets urbains solides (DUS), les données relatives à la fraction plastique pour les années 2023/2024 (jusqu'en octobre) ont été fournies par la commune de Stintino. Contrairement à d'autres municipalités, la commune de Stintino collecte séparément le fer-blanc et le métal avec le verre, de sorte que les valeurs indiquées se réfèrent exclusivement à la fraction plastique.

Mois	kg	Mois	kg
janv.-24	6540	janv.-23	3720
fév-24	5890	fév-23	2670
24 mars	3820	23 mars	10510
24 avril	6420	avril 2023	7110
mai-24	12 800	mai-23	11750
juin-24	18 210	juin-23	23020
24 juil.	39 500	juillet 2023	38760
août-24	50 850	23 août	49 510
24 sept.	23280	23 sept.	24100
oct-24	-	oct-23	9460
nov-24	-	nov-23	4510
24 déc.	-	23 déc.	3170

Tableau 1 – Données sur le tri sélectif du plastique dans la commune de Stintino pour la période 2023-2024

Les données disponibles ne distinguent pas les différents types de plastique. Pour obtenir une estimation plus précise, il est possible de se référer à des hypothèses basées sur les informations présentes dans la littérature, en tenant compte de facteurs tels que le pourcentage de plastique destiné à l'emballage, la durée de vie moyenne et les types de plastique les plus couramment utilisés.
Selon le rapport de développement durable COREPLA 2022, 39 % du plastique produit, qu'il soit vierge ou recyclé, est utilisé pour l'emballage des produits. Si l'on examine les types de plastique pour lesquels seul le matériau vierge est classé par type, 40,3 % est composé de PE et de PP, matériaux recyclables, le reste étant constitué d'autres matières plastiques en proportions moindres (Figure 1).

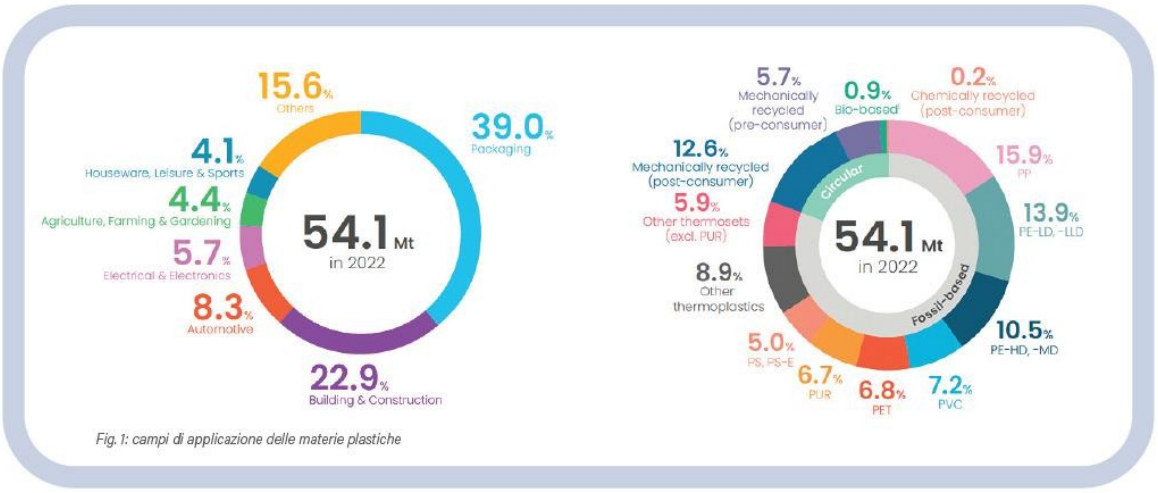

Figure 1 - Traitement des données COREPLA à partir des documents de PlasticsEurope : The Circular Economy for Plastics.

On constate que les plastiques utilisés pour l'emballage — en particulier celui des denrées alimentaires — ont un cycle de vie extrêmement court : ils sont produits, utilisés et éliminés en l'espace de quelques jours. Par conséquent, ces emballages représentent l'une des fractions les plus importantes du tri sélectif.
En analysant la composition des déchets d'emballage, on constate qu'ils sont principalement constitués de PET, de PE et de PP et, dans une moindre mesure, d'autres matières plastiques (5 à 6 types).
Par conséquent, le pourcentage de déchets plastiques d'emballage peut être utilisé comme estimation du total des plastiques recyclables. Il convient de souligner que cette estimation est indicative et que la valeur ainsi calculée est surestimée. De plus, elle ne reflète pas de manière exhaustive la composition de la fraction plastique dans les déchets urbains solides, bien que les déchets d'emballage constituent la majeure partie des plastiques produits.
Sur la base de ces prémisses, une installation située dans la commune de Stintino qui aurait pour objectif de traiter l'ensemble des déchets plastiques d'emballage collectés localement pourrait être dimensionnée en considérant une activité de 200 jours ouvrables par an, avec des équipes de 8 heures par jour, et une capacité d'environ 120 kg/h. Il s'agit d'une estimation prudente et surdimensionnée, compte tenu également du fait que le nombre de jours ouvrables peut atteindre 260 et que le calcul inclut également les matériaux multicouches. En appliquant un coefficient de réduction de 39 % à la valeur maximale (120 kg/h), on obtient une capacité plus réaliste d'environ 70 kg/h.
Enfin, si l'on compare ce chiffre à la quantité de plastique récupérée en mer, soit environ 0,45 kg/h, on constate une différence significative de deux ordres de grandeur par rapport au plastique collecté via le système urbain de gestion des déchets.

En ce qui concerne la commune d'Ile Rousse, les données relatives à la collecte des déchets plastiques en mer sont estimées sur la base de l'analyse des données présentes dans la littérature. Le rapport *« MACRO-DECHETS en Méditerranée française : État des connaissances, analyses des données de la surveillance et recommandations, 2011 »,* qui analyse la répartition des déchets marins sur les côtes et dans les mers françaises, y compris en Corse, il ressort ici aussi que 70 à 80 % du total des déchets marins collectés sont constitués de plastique. Contrairement aux rapports cités pour Stintino, celui-ci n'a analysé que les macro-déchets, de plus, l'analyse a été effectuée en mer à différentes profondeurs et non sur la côte, et la zone cartographiée concerne la partie est de la Corse où, en raison des courants, les accumulations sont plus importantes que dans la zone nord-est. Les données indiquent les types de plastique, mais un pourcentage de 63 % pour les plastiques génériques, associé à un pourcentage de 11 % de bouteilles en plastique.

D'après l'étude d'échantillonnage *« An integrative assessment of the plastic debris load in the Mediterranean Sea »,* qui a analysé la distribution et la composition des plastiques en surface dans la mer Méditerranée à partir de divers prélèvements effectués entre juin et novembre 2014, il ressort que sur le total des

plastiques collectés, 97 % des particules de MP étaient des matériaux synthétiques, principalement des polyoléfines, le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) (matières plastiques qui, de par leur nature, flottent) représentant respectivement 67,3 ± 2,4 % et 20,8 ± 2,1 % des polymères collectés. Ces données concordent avec celles d'autres études. Par exemple, l'étude intitulée « *Oceanographic and anthropogenic variables driving marine litter distribution in Mediterranean protected areas: Extensive field data supported by forecasting modelling* » indique que les matériaux thermoplastiques polyoléfiniques, représentés par le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) (95 % au total), sont les plus abondants car ce sont des polymères à flottabilité positive (0,90–0,99 g/cm³ ; 0,85–0,92 g/cm³). De plus, le PE et le PP ont un temps de séjour plus long à la surface de la mer et ont tendance à s'y accumuler. Le tableau 2 présente notamment les données relatives à un échantillonnage effectué au nord-ouest de la Corse, au large de la zone d'Ile-Rousse (voir coordonnées).

Start_lat	Start_lon	Latitude de fin	End_lon	Distance de départ de la côte (km)	Distance de départ de la côte (km)
42,9109	8,9667	42,9356	8,9183	25,134	27,937

Poids du plastique < 5 mm (g/km²)	Poids du plastique 5-20 mm (g/km²)	Poids du plastique > 20 mm (g/km²)
56,09120101	70,80797049	0,663382921

Tableau 2 - Données relatives au large de l'Île-Rousse, été 2014

En ce qui concerne la zone d'intérêt de l'Île-Rousse, en tenant compte également d'études sur la répartition des déchets sur les fonds marins [19] et en surface [20], la densité des déchets s'élève à quelques centaines de grammes par km^2 . La plus forte concentration de déchets se situe entre la côte est de la Corse et l'archipel toscan, zones d'accumulation dues à l'action des courants, avec des accumulations pouvant atteindre 10 kg/km^2[21]. Il convient toutefois de noter qu'il n'est pas possible de tirer des conclusions et qu'il est nécessaire d'approfondir la cartographie.
En ce qui concerne les sédiments le long de la côte près de l'Île-Rousse, nous pouvons analyser les données recueillies par le projet RIPARU [21], qui a effectué des prélèvements sur les principales plages de la côte nord de la Corse, notamment : *la plage d'Alisu, la plage de Ferringule, la plage de l'Ostriconi, la plage de la Roya, la plage de Saleccia et la plage de Lozari*. Dans cette étude, les matériaux sont classés par secteur d'intérêt, ce qui ne permet pas de rendre compte directement des quantités par type de plastique.

En ce qui concerne les déchets collectés dans les conteneurs et remis par les citoyens, d'après les données du site Syvadec et de l'Odem, les données mensuelles et annuelles sont définies par province et non par commune. La figure 2 présente les quantités en tonnes d'emballages collectés dans la province d'Ile Rousse Balagne en 2023.

Flux	Tonnages receptionnés par matiere	Tonnage	Année	Mois	Nom_adh_court	ResponsableTraitement	Selecteur_pop
Collecte sélective	Emballages	23	2023	février	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	29	2023	janvier	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	30	2023	décembre	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	32	2023	mars	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	34	2023	novembre	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	34	2023	avril	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	40	2023	octobre	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	44	2023	mai	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	55	2023	juin	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	55	2023	septembre	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	69	2023	juillet	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171
Collecte sélective	Emballages	92	2023	août	CC Ile Rousse Balagne	SYVADEC	2023 - 171

Figure 2 - Tonnes de déchets d'emballages de la région d'Ile Rousse Balagne

De plus, la fraction de déchets est définie comme « emballages », mais il n'est pas précisé s'il s'agit uniquement de plastique générique ou précisément d'emballages. Afin d'obtenir des données plus précises, nous avons contacté l'entreprise en charge de cette question, qui nous a fixé un rendez-vous pour juin 2025. Avant cette date, il n'est donc pas possible d'effectuer une prévision préliminaire directe concernant uniquement la commune d'Ile Rousse.

3. État des lieux du recyclage mécanique des matières plastiques post-consommation

Le recyclage mécanique [1] des matières plastiques peut être subdivisé en [11], [22] :

1. **Recyclage primaire** :
    - Il s'agit de la réutilisation directe de déchets industriels ou de matières plastiques déjà nettoyées et homogènes.
    - Elle ne nécessite pas d'étapes complexes de séparation ou de nettoyage.
    - Le processus consiste principalement en un broyage, une regranulation et une extrusion pour créer de nouveaux produits.
2. **Recyclage secondaire** :
    - Il concerne les plastiques post-consommation, c'est-à-dire ceux provenant des ménages, souvent sales et composés de différents polymères.
    - Il nécessite des étapes de tri, de lavage et de purification avant la regranulation.
    - Le matériau obtenu peut présenter des propriétés inférieures à celles du plastique vierge, ce qui limite certaines applications.

Une installation de recyclage secondaire reçoit généralement des matériaux traités au sein d'un centre de tri et de stockage (CSS) qui produit en sortie des sacs de matériaux (big bags) ou des matériaux compactés (ecoballe) issus de plastiques d'emballage triés en fractions[2] . La séparation effectuée dans les CSS est un processus complexe, étant donné que la séparation des déchets plastiques mixtes implique souvent l'utilisation combinée de différentes technologies [23]. De nombreuses techniques de tri différentes ont été développées, telles que le tri par gravité à sec ou humide, le tri électronique ou magnétique par densité, la flottation et le tri par capteurs NIR, ainsi que des techniques de tri auxiliaires comme le tri magnétique ou par courants de Foucault [24].
Selon la qualité de la séparation et le type de procédé adopté, les fractions peuvent encore contenir des résidus métalliques et des fractions organiques indésirables qui doivent être éliminés de manière appropriée par le recycleur.
L'installation de traitement des matières plastiques du recycleur est principalement divisée en deux grandes zones :

1. **Zone de préparation des matières post-consommation présélectionnées** – broyage, premier lavage, concassage, deuxième lavage, séchage et dessiccation. De plus, à chaque étape, le plastique est soumis à une séparation supplémentaire afin de garantir un niveau optimal de pureté et de qualité.

[1] *Recyclage mécanique :* transformation des déchets plastiques en granulés de plastique sans altérer la structure chimique des plastiques monomatériaux.
[2] *Fraction :* quantité de matière qui a été triée après la collecte, mais qui n'a pas été suffisamment préparée pour être considérée comme une matière première secondaire.

2. **Zone de retraitement ou de reprocessing** – Le matériau prétraité est soumis à des processus de fusion, de filtration et d'extrusion visant à obtenir des granulés de matière première secondaire.[3]

Pour chaque zone, les paragraphes suivants exposent les particularités et justifient la nécessité d'utiliser chaque machine, en indiquant les entreprises qui proposent les technologies nécessaires sur le marché.

3.1. Zone de préparation des matériaux post-consommation présélectionnés

Le matériau entrant est soumis à un broyage, un processus de concassage grossier qui réduit le matériau en morceaux d'une taille comprise entre 50 et 200 mm, facilitant ainsi les étapes de traitement suivantes. Après cette première phase, une séparation est effectuée pour éliminer les éventuels éléments métalliques qui auraient pu échapper aux contrôles préliminaires. Le matériau traité est ensuite acheminé vers un premier bac de lavage, où les impuretés les plus grossières, telles que le sable, la terre et les cailloux, sont éliminées par criblage. Par la suite, le matériau subit un broyage humide, au cours duquel sa taille est encore réduite et où la friction entre les particules poursuit le travail de lavage. Après cette étape, le matériau passe par un deuxième lavage, puis entre dans un bac de flottation où s'effectue une séparation gravimétrique. Ici, les plastiques polyoléfiniques (tels que le PE et le PP) flottent et sont séparés des autres matériaux qui, étant plus lourds, tombent au fond (généralement le PET). Les matériaux plus lourds sont collectés et évacués par une vis sans fin. Le matériau sélectionné poursuit le processus par un troisième lavage par friction, suivi d'une centrifugeuse qui élimine l'eau de surface. Enfin, le matériau est séché pour éliminer l'humidité résiduelle, tant superficielle qu'interne [25].

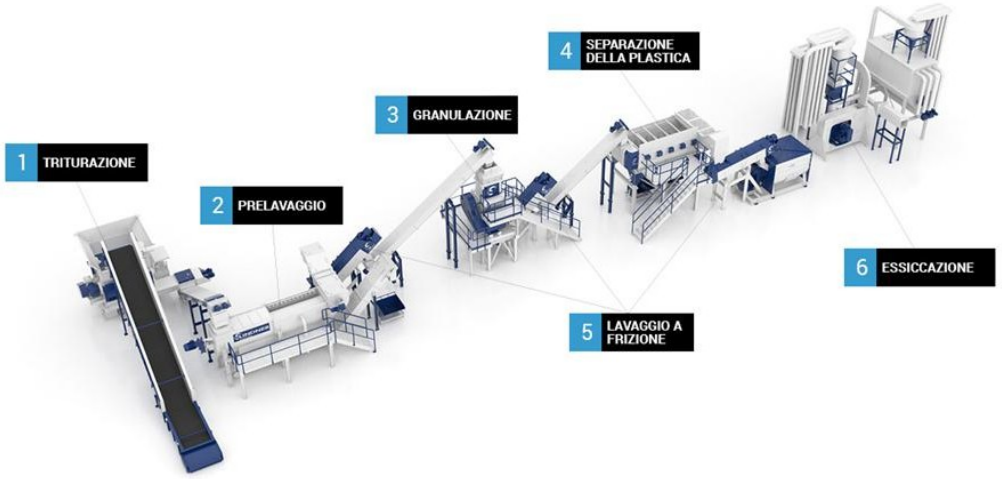

Figure 3 – Ligne de préparation Lindner [25]

3.1.1 Broyage

Le broyage est une première étape plus grossière, principalement utilisée pour réduire la taille des morceaux, afin de les rendre aptes au lavage ultérieur. De plus, il permet de séparer les matériaux assemblés (tels que les âmes et la quincaillerie), qui seront ensuite extraits par séparation magnétique.
La réduction du matériau en flocons s'effectue par broyage, à l'aide de broyeurs conçus pour être

[3] *Matière première secondaire (matériau recyclé) :* matériau qui a été trié, retraité et préparé de manière à être apte à une utilisation directe dans la fabrication de nouveaux produits, sans tri ni préparation supplémentaires (par exemple, copeaux, granulés ou billes de polymère propres et secs).

robustes et résistants à l'usure, adaptés au broyage de corps étrangers tels que des éléments métalliques, des cailloux et de la terre.

Figure 4 – Schéma des éléments fonctionnels, broyeur Untha [26]

Les broyeurs, également appelés familièrement « moulins », se composent principalement de quatre parties :

- La trémie pour l'introduction des matériaux
- La transmission composée d'un moteur et d'une courroie de transmission ou d'engrenages
- La chambre de coupe, qui contient les arbres et les couteaux de coupe
- L'orifice de sortie pour l'éjection du matériau

Les différentes constructions se distinguent par :

- Le type de couteaux utilisés
- Le nombre d'arbres présents
- Le perçage de la grille de sortie

La taille du matériau d'entrée dépend de la taille du broyeur, qui dépend elle-même : de la taille de la trémie de chargement, de la taille des arbres de coupe et donc de la chambre de coupe.

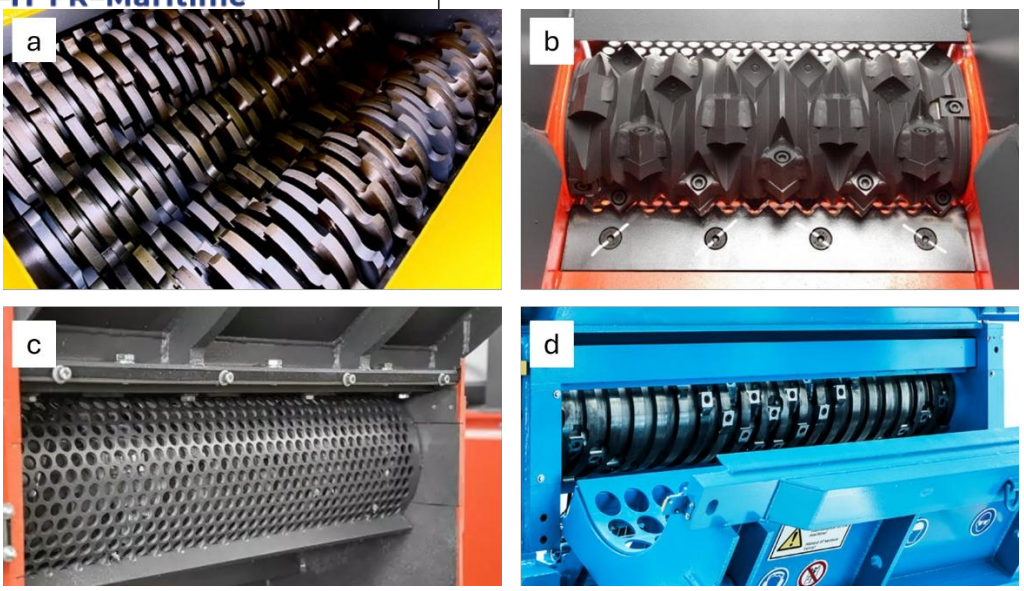

Figure 5 a) Quatre arbres avec des couteaux à disque en alliage d'acier résistant à l'usure b) Arbre unique avec des lames rapportées, généralement frittées c) Grille à mailles serrées d) Arbre unique avec des lames rapportées et grille à mailles larges

Les broyeurs à lames rapportées (Fig. 5 (b) (d)) sont généralement utilisés pour broyer des matériaux rigides (plastiques durs, plastiques renforcés, plastiques épais ou résistants, matériaux aux propriétés abrasives) qui nécessitent une force de coupe plus importante et une meilleure résistance à l'usure [27]. Ces appareils fonctionnent à des vitesses de rotation plus élevées que les broyeurs à plusieurs arbres et utilisent un poussoir hydraulique pour comprimer le matériau contre les couteaux de coupe, améliorant ainsi l'efficacité de la fragmentation et réduisant l'effet de rebond, phénomène qui se produit lorsque le matériau introduit heurte l'arbre rotatif et est repoussé au lieu d'être traité, ce qui réduit l'efficacité globale de la machine. À l'inverse, les broyeurs à plusieurs arbres à lames (Fig. 5 (a)) sont conçus pour traiter des matériaux plus volumineux, encombrants et moins rigides, qui ont tendance à rebondir sur les arbres rotatifs ou à s'enrouler autour de l'arbre, ce qui crée des difficultés d'alimentation dans une configuration à arbre unique. Les vitesses de rotation de ces broyeurs sont réduites, ce qui favorise un couple de coupe plus élevé [28]. Les arbres supérieurs remplissent une double fonction : saisir le matériau et l'acheminer vers les arbres inférieurs, où s'effectue la phase de broyage. Dans les deux cas, la granulométrie finale du matériau broyé est réglée à l'aide de grilles de sortie, qui déterminent la taille souhaitée des particules. La taille des copeaux en sortie varie en fonction des grilles, dans une plage de dimensions qui peut être plus ou moins large par rapport à la taille des perforations de la grille. En effet, il est possible que des particules beaucoup plus petites se forment ou que des morceaux d'une largeur égale à celle des perforations mais plus longs passent à travers. Par exemple, une grille de 10 mm peut produire des copeaux de 5 à 15 mm.

3.1.2. Broyage

Le broyage est une opération effectuée pour réduire davantage la granulométrie du matériau, permettant un contrôle précis sur les dimensions du produit en sortie. Le broyeur, également appelé granulateur ou, de manière informelle, moulin, présente une construction similaire à celle du concasseur, mais les différences substantielles se trouvent dans la chambre de coupe et, en particulier, dans le mécanisme de coupe. Le mécanisme de coupe à utiliser dépend à la fois du matériau à traiter et de la granulométrie souhaitée.

Les mécanismes de coupe les plus couramment utilisés sont :

- Coupe à lame en ciseaux : utilisée pour les plastiques souples ou semi-rigides, tels que les films plastiques, les feuilles et les matériaux similaires.

- Coupe à marteau ou par percussion : idéale pour les matières plastiques dures, telles que les déchets de polypropylène (PP) ou de polyéthylène (PE) de forte épaisseur, mais aussi pour des matériaux plus souples comme les bouteilles en PET.
- Coupe par friction : utilisée pour les matériaux plus résistants, tels que certains types de PVC ou d'autres polymères rigides.

Dans les broyeurs/granulateurs, la chambre de coupe est conçue pour être plus précise, offrant une coupe fine qui réduit le matériau en petits granulés. C'est pourquoi on les appelle également granulateurs. Les broyeurs à marteaux et à friction, par exemple, sont utilisés lorsqu'on souhaite obtenir des particules de très petite taille, telles que des poudres de l'ordre du micron, et sont rarement utilisés dans le recyclage des plastiques post-consommation. C'est pourquoi cette section approfondira les caractéristiques de construction des broyeurs/granulateurs à lames rotatives qui nous intéressent le plus.

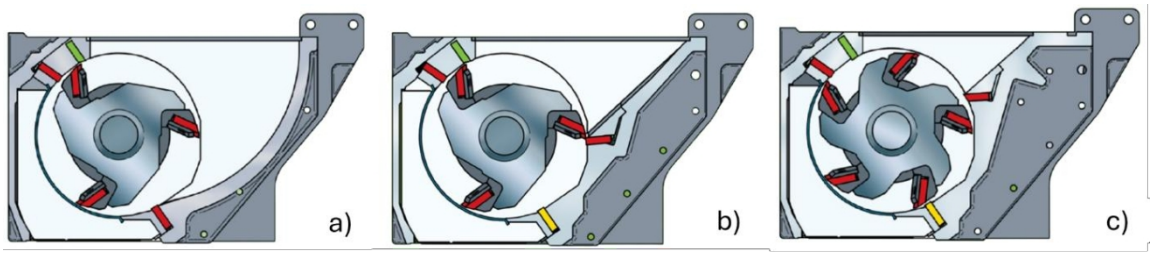

Figure 6 a) Chambre super tangentielle b) Chambre tangentielle c) Chambre tangentielle avec pré-coupe [29]

La figure 6 présente les configurations les plus courantes de la chambre de coupe. La chambre de coupe peut être :

- Super tangentielle : cette configuration utilise deux lames fixes (indiquées en rouge) et peut inclure une troisième lame en option (verte) pour augmenter la productivité, notamment lors du traitement de déchets volumineux. L'utilisation de la troisième lame permet d'améliorer l'efficacité lors du traitement de matériaux plus grands et encombrants.
- Chambre tangentielle : dans cette configuration, on utilise généralement deux lames fixes (rouges). Si nécessaire, il est possible d'ajouter une ou deux lames fixes en option (vertes/jaunes) pour augmenter la productivité. Cette option est utile lorsqu'il est nécessaire de traiter de grands volumes de matière dans des délais plus courts.
- Chambre avec pré-découpe : ce type de configuration est recommandé pour le broyage de matériaux de forte épaisseur, tels que les plaques, les tuyaux, les résidus de découpe, etc. Dans ce cas, les troisième et quatrième lames sont en option, et la présence de cinq lames rotatives, également facultatives, peut être utilisée pour augmenter encore davantage la productivité. Cette configuration est idéale pour traiter des matériaux plus difficiles et volumineux.

La disposition des couteaux internes peut être linéaire, à rotor ouvert ou décalée à rotor décalé. Dans la première configuration, l'angle de coupe peut être nul ou plus ou moins aigu, selon les besoins (Fig. 7). La deuxième configuration améliore l'efficacité globale de la machine, grâce à une dynamique de coupe optimisée qui réduit la puissance installée et améliore la prise du matériau, ce qui la rend particulièrement adaptée aux matériaux volumineux tels que les bouteilles, les flacons et les bidons ayant tendance à rebondir sur les couteaux. Il existe différentes solutions de construction, dont certaines sont illustrées à la Fig. 8.

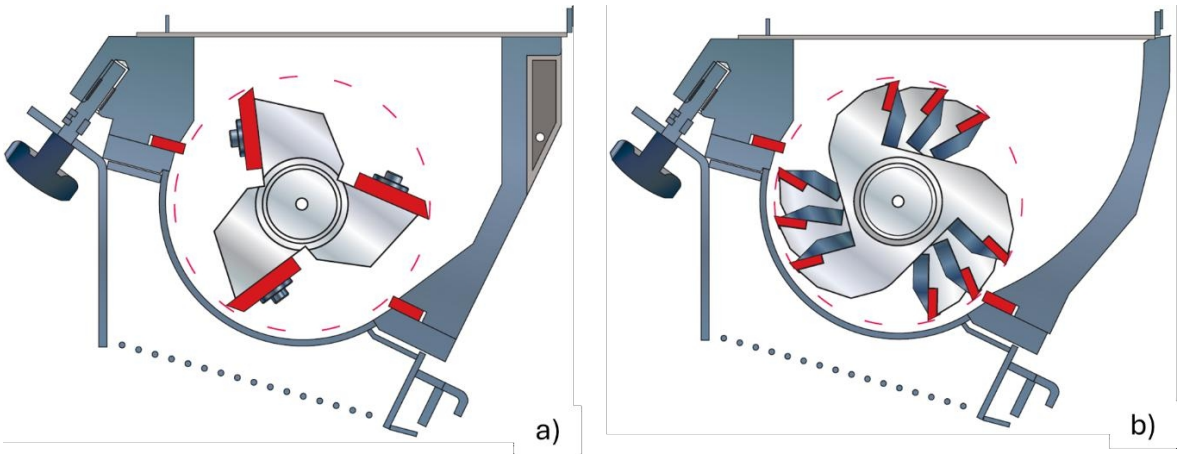

Figure 7- a) Coupe du rotor ouvert b) Coupe du rotor décalé [29]

Figure 8 – Broyeur à couteaux à rotor décalé en deux solutions techniques de construction [30], [31]

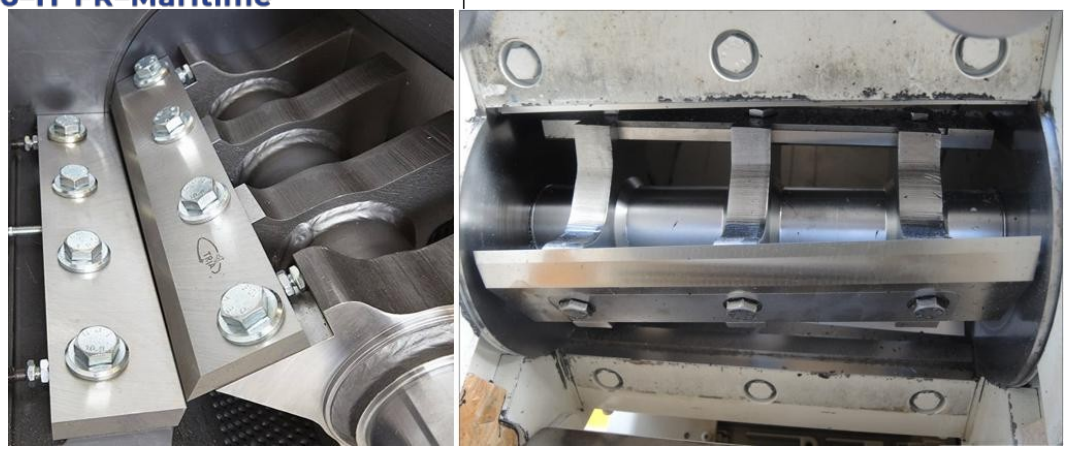

Figure 9 - Broyeur à rotor ouvert, à couteaux droits avec deux angles de coupe différents [32], [33]

Comme pour les broyeurs, la productivité d'un granulateur est définie en fonction de la grille de tamisage spécifique du matériau en sortie. La grille est identifiée par le diamètre des perforations pratiquées et par le rapport surface vide/surface pleine de la tôle. À mesure que la taille des trous augmente, la productivité augmente par rapport à la valeur spécifique ; à l'inverse, lorsque la taille des trous diminue, la productivité diminue. Par exemple, un granulateur d'une capacité de 80 kg/h, équipé d'une grille de 8 mm, peut perdre jusqu'à 40 % de sa productivité s'il est équipé d'une grille de 3 mm.

Le broyage des matériaux dans les broyeurs peut s'effectuer à sec, avec éventuellement un transport pneumatique, ou par voie humide, avec un transport dans l'eau. Les vitesses de rotation élevées du rotor génèrent une chaleur considérable, qui peut, dans certaines circonstances, entraîner la dégradation du matériau. C'est pourquoi les broyeurs à sec peuvent, si nécessaire, être équipés de chambres de refroidissement à eau.

Lorsque l'application le permet, comme dans la valorisation des emballages, on recourt généralement au broyage sous eau [34,35]. Dans ce procédé, un flux d'eau transporte le matériau broyé dans la chambre de coupe. Cette technique réduit considérablement la production de poussières et, si elle est intégrée au cycle de lavage, grâce au frottement généré, elle facilite grandement l'élimination des incrustations et contribue au refroidissement du matériau [34].

3.1.3. Séparation

La séparation mécanique des matières plastiques et non plastiques peut s'effectuer à l'aide de différentes technologies, dont la complexité varie. Cela va des techniques les plus simples, comme la flottation, jusqu'aux solutions plus avancées, telles que la séparation électrostatique et par infrarouge (IR). Dans les centres de tri et de sélection (CSS), la séparation des matériaux est souvent effectuée à l'aide de méthodes intégrées, visant à garantir que le matériau recyclé soit de la meilleure qualité possible. Ce processus est essentiel pour optimiser la récupération des matériaux et pour garantir que le recycleur reçoive des matériaux de haute qualité.

Dans les centres de valorisation, les matériaux provenant des CSS sont traités davantage afin de séparer les plastiques qui auraient pu échapper à la phase de tri initiale ou qui ont été utilisés pour l'emballage du lot de matériaux à traiter. La séparation des matériaux métalliques, par exemple, s'effectue à l'aide de systèmes installés sur les bandes de chargement des broyeurs. [24]

Dans le cas des installations traitant des matières plastiques telles que le PET, le PP et le PE, la séparation des plastiques est généralement effectuée par flottation dans l'eau. Ce procédé est particulièrement utile pour séparer des matériaux tels que les résidus de bouteilles en PET qui pourraient rester collés aux bouchons, ou inversement, lorsque les bouchons restent collés aux bouteilles.
La séparation de ces matériaux est effectuée après le processus de broyage, car à ce stade

il devient plus facile d'obtenir une séparation nette des fractions.

La séparation par flottation s'effectue à l'aide de cuves de flottation et de décantation.
Les cuves de flottation ou de décantation sont des équipements simples et efficaces, souvent fabriqués en acier inoxydable AISI 304 [34], [36], qui permettent une séparation mécanique performante. Ces cuves sont équipées d'une entrée ou d'une bouche de chargement munie d'une vis sans fin, qui pousse les matières dans le fluide de séparation (Fig. 10). Une fois immergé dans le fluide, le matériau flottant est poussé et brassé par des rouleaux rotatifs munis de pales, qui facilitent le mouvement du matériau flottant à l'intérieur de l'eau de nettoyage et le poussent vers un dernier rouleau extracteur. Ce rouleau, à l'aide d'une vis sans fin, sépare les matières flottantes de l'eau en sortie, qui est traitée et recyclée dans le bassin pour une réutilisation continue.

Les matières qui coulent, en revanche, sont acheminées par une vis sans fin horizontale vers le côté du bassin. Ensuite, une vis sans fin inclinée sépare les matières de l'eau, les dirigeant vers les étapes suivantes du processus de traitement. Cette technologie permet une séparation efficace des matières, améliorant la qualité des matières recyclées et facilitant le traitement des plastiques et des métaux séparés.

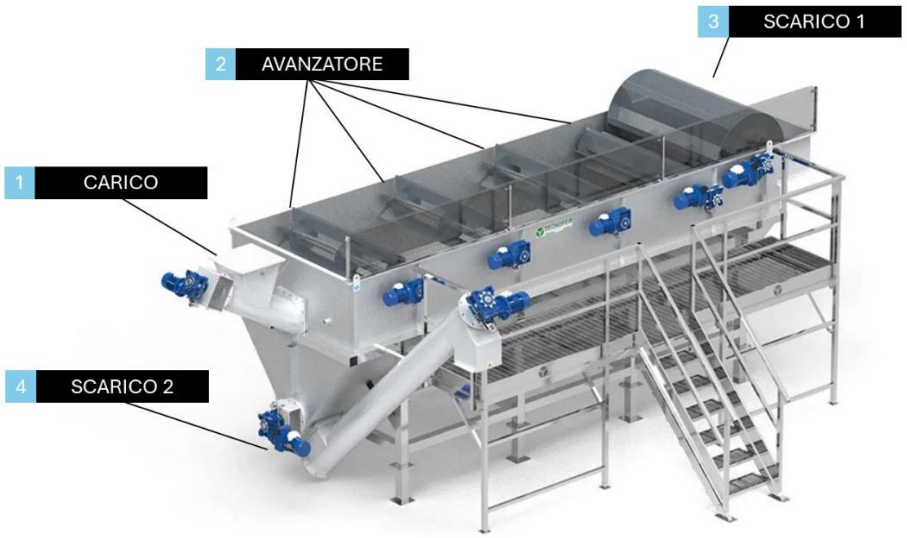

Figure 10 - Cuve de flottation Tecnofer [34]

3.1.4. Nettoyage et lavage

Dans le recyclage des matériaux post-consommation, l'une des opérations fondamentales pour obtenir un matériau de qualité est le nettoyage par lavage. En effet, les plastiques post-consommation sont généralement contaminés par des résidus organiques, des détergents, de la colle et des étiquettes en papier, dont l'élimination nécessite un lavage en plusieurs étapes ; dans certains déchets, on peut également trouver des matériaux solides tels que de la terre ou des cailloux qui doivent être séparés. Comme indiqué précédemment, les différentes étapes de lavage sont intercalées entre les opérations de réduction de la taille des morceaux et de séparation des matériaux.
L'élimination des matières solides peut être effectuée avant la réduction de la taille des morceaux de matière à l'aide de trommels, des tambours rotatifs perforés utilisés dans le double but de séparer les plastiques en différentes tailles et d'éliminer les cailloux et les matières solides.
En post-broyage, dans les installations en ligne, on utilise principalement des laveuses horizontales en série.
La machine à laver horizontale est conçue pour le traitement des plastiques, en particulier des flocons de plastique rigides ou

souples, provenant d'un processus de broyage primaire ou d'un broyeur. Le rotor interne, qui tourne à grande vitesse, est doté d'une géométrie spécifique qui empêche les bourrages, même avec des matériaux de taille moyenne.

L'effet centrifuge de la laveuse horizontale repose sur la combinaison d'un frottement mécanique et de l'utilisation d'une grande quantité d'eau, garantissant ainsi un nettoyage efficace du matériau. Les contaminants, qui constituent avec l'eau les effluents, sont ensuite expulsés à travers un panier perforé et recueillis dans la trémie située en dessous. (Fig. 11)

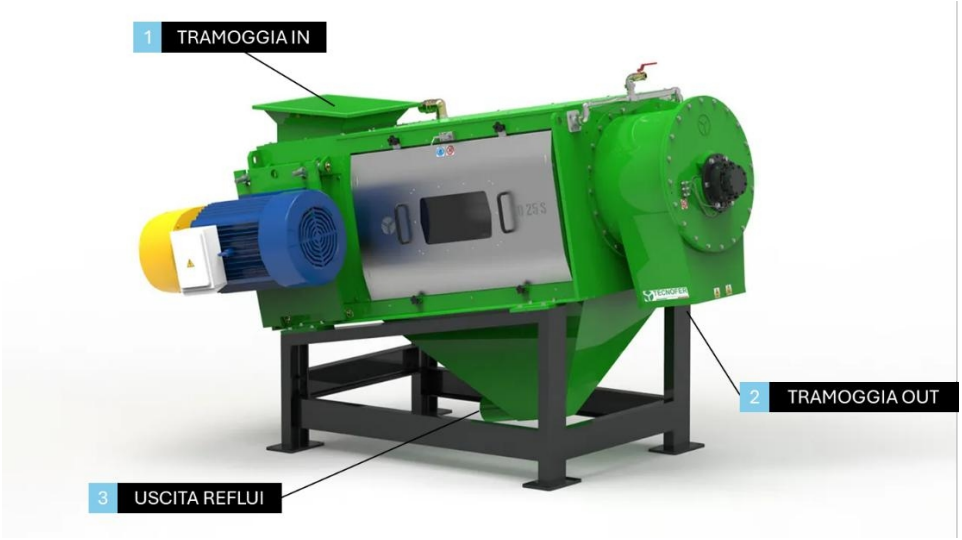

Figure 11 - Laveuse horizontale Tecnofer [34]

Dans certaines installations, il est également possible d'utiliser des laveuses verticales, conçues pour fonctionner de manière intermittente. Le fonctionnement de ces laveuses prévoit une séquence divisée en plusieurs phases : chargement, lavage, rinçage et vidange. La possibilité de varier la durée du cycle de lavage permet d'obtenir un niveau de nettoyage optimal, quel que soit le degré de contamination du matériau.

Le matériau est introduit dans la chambre de lavage à l'aide d'un panier perforé. En général, le fluide utilisé pour le lavage est de l'eau froide, mais pour améliorer la qualité du nettoyage, celle-ci peut être additionnée de détergents non moussants. En cas de contaminations particulièrement difficiles, de l'eau chaude peut être utilisée. Pour obtenir un degré de pureté particulièrement élevé, par exemple pour les flocons de PET, les lignes peuvent être équipées d'un système de lavage à friction élevée, qui utilise de l'eau chaude et un détergent (tel que le NaOH). [25], [34], [37], [38], [39], [40]

Figure 12 – Laveuse verticale Sikoplast [38]

3.1.5. Séchage, dessiccation, déshumidification

Dans le processus de recyclage des déchets plastiques post-consommation, en particulier les emballages, une étape cruciale se situe entre la sortie de la machine à laver et l'entrée de l'extrudeuse. À ce stade, l'objectif principal est d'éliminer l'humidité présente dans les matériaux, tant celle en surface (eau libre) que celle absorbée à l'intérieur de la structure moléculaire, en distinguant les plastiques hygroscopiques des plastiques non hygroscopiques.
Lorsqu'on parle d'élimination de l'humidité, il convient donc de garder à l'esprit l'existence de deux familles distinctes de matières plastiques : les matières hygroscopiques et les matières non hygroscopiques.
Les polymères hygroscopiques (par exemple : PA, PMMA, PET) se caractérisent par l'absorption d'eau à l'intérieur du granulé plastique ; dans les polymères non hygroscopiques (par exemple : PE, PP, PS, PVC), en revanche, l'eau ne peut pas pénétrer à l'intérieur du matériau mais se dépose uniquement à la surface [22]

Le premier traitement de séchage après le lavage est généralement confié à des centrifugeuses dynamiques, utilisées pour éliminer l'eau libre présente à la surface des flocons de plastique. Ces systèmes, équipés de tambours rotatifs ou de vis sans fin internes, fonctionnent à des vitesses de rotation élevées (jusqu'à 1 000–1 500 tr/min) et sont capables de réduire l'humidité résiduelle de plus de 90 %. Ils s'avèrent particulièrement efficaces et performants sur le plan énergétique pour des matériaux tels que le PE, le PP, le PET et le PS.

En fonction de la configuration de l'installation, qui peut être en ligne ou par lots, on utilise des centrifugeuses à développement horizontal ou vertical. La différence entre les deux types réside principalement dans l'orientation de l'axe du rotor.

Figure 13 – Centrifugeuse verticale Filtec [36]

Dans le cas d'une centrifugeuse verticale (Fig. 13), le matériau est introduit dans la partie inférieure de la machine par une vis sans fin, puis poussé vers le haut par un arbre à pales rotatif. Le rotor est entouré d'un stator fixe muni d'une grille microperforée, qui permet la séparation de l'eau et du matériau plastique lors du passage.

La combinaison d'une vitesse de rotation élevée, d'un panier perforé et d'un flux d'air interne permet l'expulsion efficace de l'eau à travers les trous de la grille, qui est ensuite acheminée vers la sortie. À la fin du processus, le matériau séché est extrait et purifié davantage grâce à un système d'aspiration relié à un séparateur à cyclone, capable d'éliminer d'éventuels contaminants résiduels ou fractions indésirables légères.

Figure 14 - Centrifugeuse horizontale Filtec [41]

Par la suite, afin d'augmenter encore le degré de séchage ou de traiter des matériaux plus humides ou agglomérés, tels que des matériaux très fins, comme les films plastiques, communément appelés flocons bidimensionnels, le processus peut prévoir un passage dans des séchoirs à vis.

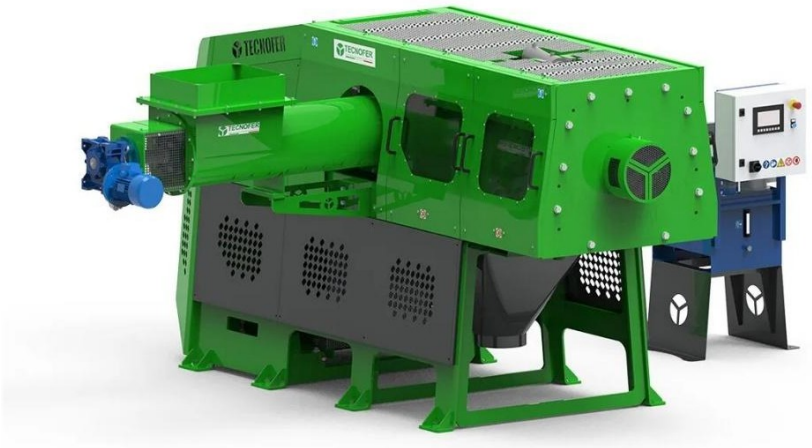

Figure 15 - Presse à vis Tecnofer [34]

Le système de séchage avec presse à vis repose sur un pressage mécanique, généré par une vis sans fin agissant à l'intérieur de cylindres perforés. Ce mécanisme permet de réduire l'humidité résiduelle dans le matériau plastique, comme les flocons, pendant le processus de compactage.
La section finale de déchargement de la presse est équipée de fermetures hydrauliques qui ralentissent le mouvement du matériau. Ce ralentissement favorise le compactage des flocons et une fusion partielle, facilitant ainsi l'évaporation de l'eau. L'excès d'humidité est extrait de la machine par les trous des cylindres, tandis que la matière plastique, désormais compactée et légèrement fondue, est prête à être traitée ultérieurement lors des étapes suivantes, offrant ainsi un pré-séchage efficace avant le traitement thermique final [34].

Une étape supplémentaire, particulièrement utile pour les films plastiques légers, difficiles à traiter en vrac, est représentée par les densificateurs. Il s'agit d'unités thermomécaniques qui, grâce au frottement généré, chauffent le matériau jusqu'à le faire fondre partiellement, favorisant ainsi l'évaporation de l'humidité interne et obtenant une masse plus dense et plus facile à manipuler lors des étapes suivantes.

Pour la phase de séchage, différentes approches sont adoptées en fonction de la nature hygroscopique du matériau et les technologies les plus utilisées pour éliminer l'humidité du polymère sont essentiellement au nombre de trois : le séchage sous vide, le séchage à l'air ambiant et la déshumidification (utilisation d'air préalablement déshumidifié) [42].
Les plastiques non hygroscopiques, tels que le PE, le PP et le PS, sont traités efficacement avec des séchoirs, car ceux-ci agissent en surface ; en revanche, pour les plastiques hygroscopiques comme le PET, le polyamide (PA) ou le PLA, l'utilisation de séchoirs déshumidificateurs à air sec est indispensable, car ils garantissent un séchage en profondeur et contrôlé.

Le procédé sous vide est idéal pour éliminer l'humidité des granulés, car il se déroule en l'absence d'oxygène, évitant ainsi les phénomènes d'oxydation. À pression ambiante, l'eau s'évapore à 100 °C, mais en abaissant la pression à 400 mbar relatifs, l'évaporation se produit vers 45 °C.

Cependant, le séchoir sous vide ne permet que des opérations intermittentes et non continues : lors de l'ouverture de l'autoclave, il se produit des pertes de chaleur et une réabsorption d'humidité, ce qui compromet l'homogénéité et l'efficacité du matériau.
Le séchage à l'air ambiant consiste quant à lui à insuffler de l'air à travers le matériau contenu dans une trémie, pendant une durée et à une température déterminées, et n'est efficace que pour les matériaux non hygroscopiques, car le point de rosée de l'air ambiant est variable et dépend des conditions climatiques. Par conséquent, le processus n'est pas contrôlé et ne peut être reproduit avec certitude. L'utilisation de séchoirs à air ambiant est donc limitée et dépend du pourcentage d'humidité résiduelle toléré dans les matériaux [43].
Ces installations (Fig. 16) fonctionnent dans des trémies ou des silos isolés, où l'air est chauffé par un brûleur à des températures comprises entre 120 °C et 140 °C. Le flux d'air chaud entre ensuite en contact avec le matériau plastique à recycler dans le cyclone de mélange. Au cours de ce processus, l'air saturé d'humidité, provenant du matériau plastique, est séparé par un deuxième cyclone, laissant le matériau séché exempt d'humidité résiduelle en surface. Cette méthode est simple et économique, mais insuffisante pour les matériaux qui absorbent l'eau dans leur structure moléculaire.

Figure 16 – Séchoir à air chaud de petite taille, Moretto

La déshumidification, quant à elle, utilise de l'air déshumidifié avec un point de rosée très bas (jusqu'à -40 °C), garantissant l'élimination complète de l'humidité interne et prévenant des phénomènes tels que l'hydrolyse pendant l'extrusion. Elle repose sur deux composants principaux : la trémie, dans laquelle s'effectue le traitement du matériau, et le déshumidificateur (dryer), qui génère de l'air sec à la température requise. La trémie est un récipient cylindrique isolé, muni d'une sortie inférieure conique ; pendant le traitement, le matériau est traversé par de l'air chaud et sec qui évacue l'humidité, tant superficielle que celle qui a migré depuis l'intérieur du granulé. Le déshumidificateur comprend un ventilateur de process, des tamis moléculaires (zéolithes), une chambre de chauffage équipée de résistances électriques et un générateur d'air sec [44].

Les tamis moléculaires absorbent l'humidité et, une fois saturés, doivent être régénérés, opération possible par voie thermique (chauffage à plus de 250 °C suivi d'un refroidissement) ou par variation de pression (pressure swing), qui nécessite des installations complexes et n'est utilisée que pour les petites productions. Les principaux types de déshumidificateurs sont : à tour unique, avec une seule tour et un processus intermittent ; à double tour, avec

deux tours alternées et un processus continu mais avec des influences environnementales possibles ; à double tour avec soufflante séparée, qui garantit un circuit fermé et des performances stables ; à double tour avec refroidissement en court-circuit, qui utilise un circuit fermé pour refroidir à l'eau et obtenir une régénération efficace même dans des conditions d'humidité ambiante élevée. L'échange entre les tours s'effectue « en fonction du temps » (programmé lors de la conception) ou « en fonction de la valeur du point de rosée » (lorsque l'humidité en sortie dépasse le seuil tolérable). La deuxième méthode est plus efficace, elle réduit les régénérations et prolonge la durée de vie des tamis. Les tamis zéolithiques perdent en rendement après environ 5 000 régénérations ou s'ils sont contaminés ; il est donc nécessaire d'utiliser des filtres ou des épurateurs pour éliminer d'éventuelles substances polluantes. Une trémie efficace doit présenter un rapport diamètre/hauteur correct, éviter les voies préférentielles pour les matériaux et l'air, être entièrement isolée pour garantir une répartition uniforme de la température, être équipée d'un filtre en sortie et alimentée automatiquement afin de maintenir constant le temps de séjour des matériaux.
Dans de nombreuses lignes de recyclage modernes, ces technologies sont combinées de manière modulaire ou intégrée, dans des configurations « wash–dry–extrude » qui optimisent l'espace, réduisent la consommation d'énergie et améliorent la qualité du produit final. En particulier, dans le recyclage du PET, une ligne type comprend : le lavage, la centrifugation, le séchage mécanique (à vis ou densificateur), le séchage à l'air sec, et enfin l'alimentation de l'extrudeuse via une trémie.
Ces dernières années, les innovations technologiques se sont concentrées sur les systèmes de surveillance en ligne de l'humidité (avec des capteurs infrarouges ou à micro-ondes), sur l'introduction de séchoirs sous vide pour améliorer l'efficacité énergétique, et sur des solutions de récupération de chaleur entre les différentes étapes du processus.
Le choix des technologies et des machines dépend donc du type de matériau traité. Pour les plastiques hygroscopiques, l'utilisation de déshumidificateurs haute performance est indispensable, tandis que pour les plastiques non hygroscopiques, il suffit souvent de combiner centrifugation, séchage mécanique et air chaud. Enfin, les densificateurs constituent une ressource précieuse pour le traitement des films plastiques et pour améliorer la densité apparente des matériaux, facilitant ainsi la continuité du processus de production.

3.2. Zone de retraitement ou de reprocessing

Après le lavage et le séchage, le matériau est acheminé vers la zone de granulation où, grâce à un procédé thermique, il est transformé de matière première en granulés. Au cours de ce processus, les fragments de matériau sont fondus et enrichis d'additifs en fonction des besoins spécifiques, afin de produire une nouvelle matière première. Le processus peut être réalisé à l'aide d'une extrudeuse monovis simple, d'une extrudeuse monovis en série avec une extrudeuse bivis, ou d'une extrudeuse bivis simple, selon les exigences du processus. Les extrudeuses bivis se prêtent également à l'ajout d'additifs ou de matériaux de renforcement pour créer des mélanges de matériaux ou des matériaux renforcés. Vient ensuite le processus d'extrusion, au cours duquel le matériau fondu est poussé à travers une filière dotée de plusieurs trous calibrés. Le matériau fondu en sortie forme des filaments, également appelés « spaghettis », qui sont ensuite réduits en granulés à l'aide de deux techniques de traitement principales (abordées en détail dans les chapitres suivants) :

- La coupe humide (wet), où le matériau est coupé après avoir été immergé dans l'eau
- La coupe à sec (dry)

La machine qui effectue la découpe est appelée granulateur (Dry ou Wet). Dans le cas du granulateur Wet, le matériau en sortie est séché et envoyé au séchage. Dans le granulateur Dry, en revanche, le matériau, déjà séché avant la coupe, passe directement au séchage. Après le séchage, le matériau est soumis à des processus de dépoussiérage et de tamisage, au cours desquels les granulés non conformes et les poussières générées pendant le processus sont séparés du produit fini.

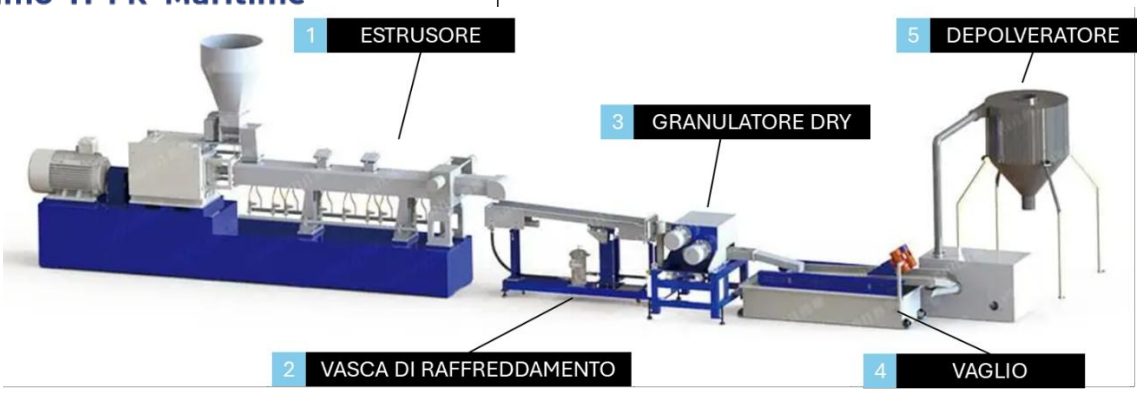

Figure 17 – Exemple de ligne de granulation à sec sans densificateur

3.2.1. Densificateur

Un densificateur pour matières plastiques recyclées est une machine utilisée pour comprimer et compacter les déchets plastiques, en réduisant leur volume et en facilitant leur traitement ou leur transport ultérieurs. Ce processus est particulièrement utile pour les matières plastiques légères et volumineuses, telles que les films plastiques, les sacs, le polystyrène expansé (EPS) et d'autres déchets à faible densité.
La phase de densification est cruciale dans le processus de recyclage des plastiques mixtes, car elle permet de réduire considérablement le volume des matériaux et de les préparer pour les étapes suivantes de granulation ou de réutilisation. La figure 18 schématise le flux de travail d'un densificateur.

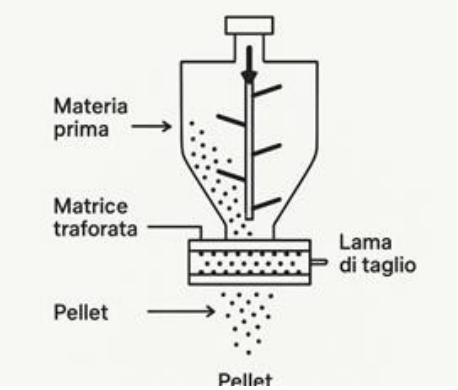

Figure 18 - Schéma d'un densificateur

Les étapes du processus de densification peuvent être résumées comme suit :

1. Chargement des matériaux : les matières plastiques à traiter (films plastiques, emballages, plastiques rigides, plastiques contaminés) sont chargées dans le densificateur.
2. Broyage et préchauffage : les matériaux sont réduits en petits morceaux à l'aide de lames rotatives. Un système de chauffage, qui peut être basé sur le frottement mécanique ou des résistances électriques, ramollit les plastiques sans les faire fondre complètement.
3. Agglomération et compactage : Le matériau plastique, partiellement fondu, s'agglomère pour former une masse plus dense. Au cours de cette phase, les impuretés légères, telles que l'humidité et les poussières, sont éliminées.
4. Refroidissement et mise en forme : si le matériau densifié n'est pas utilisé dans des processus en aval, il est ensuite refroidi à l'eau ou à l'air, ce qui stabilise sa forme compacte.

Le résultat final est un matériau compacté, qui peut se présenter sous forme de flocons ou de granulés, prêt à être

réutilisation ou à d'autres traitements.

Figure 19 - Densificateur Liontek Tecnova [45]

3.2.2. Extrudeuse monovis

L'extrudeuse monovis est une machine utilisée dans le recyclage des plastiques pour transformer la matière plastique en granulés, en feuilles ou en produits finis par un processus de fusion et de poussée.
Son fonctionnement se déroule selon les étapes suivantes :

1. *Alimentation :* la matière plastique (copeaux, granulés, densifiée) est chargée dans la trémie.
2. Transport et fusion : une vis rotative pousse la matière le long d'un cylindre chauffé, permettant sa fluidification progressive.
3. Homogénéisation : le plastique fondu est mélangé pour obtenir une masse homogène.
4. Filtration : un filtre élimine les impuretés telles que les métaux ou les résidus non plastiques.
5. Extrusion : le matériau est poussé à travers une filière qui lui donne la forme souhaitée (granulés, tubes, feuilles, etc.).
6. Refroidissement et découpe : le produit extrudé est refroidi et, si nécessaire, découpé.

La trémie d'alimentation peut recevoir la matière plastique sous forme de copeaux, de granulés ou de matière densifiée et peut également être équipée de systèmes de séchage ou de prétraitement.
La vis d'extrusion, qui constitue l'élément central de la machine, tourne à l'intérieur d'un cylindre chauffé divisé en trois sections principales :

1. Zone d'alimentation : la vis recueille la matière dans la trémie et la pousse vers l'avant.
2. Zone de compression : la vis présente un diamètre croissant afin de comprimer et de fluidifier le plastique.
3. Zone de dosage : le matériau est homogénéisé avant la sortie.

Le cylindre, qui abrite la vis, est équipé de résistances électriques pour chauffer le plastique jusqu'au point de fluidification, ainsi que de ventilateurs et de thermocouples pour contrôler la température avec précision, évitant ainsi la surchauffe du matériau et le risque de dégradation.

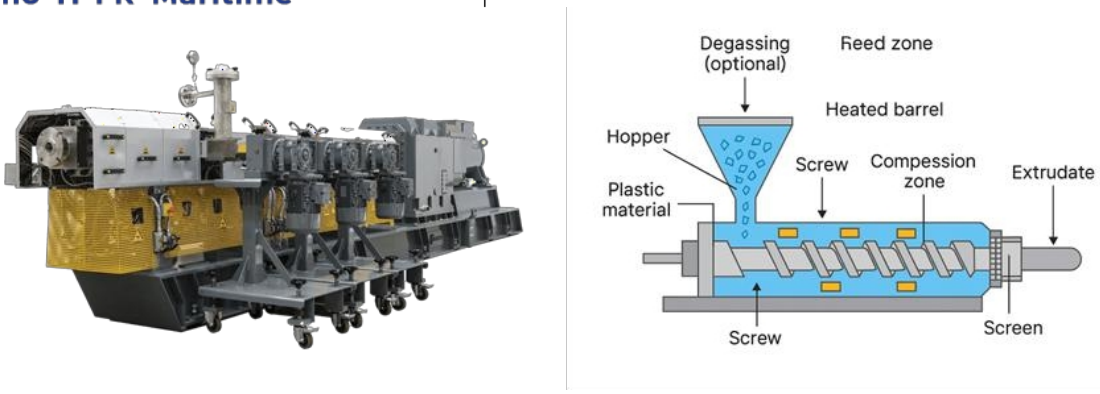

Figure 20 – Photo d'une extrudeuse Mariscorp [46] et schéma d'une extrudeuse monovis

Pour que la matière première puisse être correctement introduite dans l'extrudeuse, il est essentiel que ses dimensions soient adaptées à la vis d'extrusion. En particulier, les dimensions de la matière sortant du broyeur doivent être proportionnelles à la capacité de l'extrudeuse : plus petites pour les extrudeuses à faible productivité (exprimée en kg/h) et plus grandes pour les extrudeuses à haute productivité. Par exemple, la vis d'une extrudeuse de 50 kg/h aura des dimensions supérieures à celles d'une extrudeuse de 10 kg/h. Par conséquent, la taille de la matière broyée doit être évaluée en fonction des caractéristiques de la vis de l'extrudeuse à laquelle elle est destinée.

3.2.3. Extrudeuse à double vis

L'extrudeuse à double vis est une machine particulièrement adaptée aux matériaux hétérogènes et fortement contaminés. Ce type d'extrudeuse est équipé de deux vis co-rotatives ou contre-rotatives qui garantissent un excellent mélange, un dégazage et une homogénéisation de la matière plastique fondue.

Figure 21 – Détail des vis à l'intérieur des cylindres chauffés d'une extrudeuse à double vis.

Grâce à sa grande capacité de mélange, supérieure à celle de l'extrudeuse monovis, et à la possibilité de traiter des matériaux présentant des niveaux élevés de contamination, l'extrudeuse à double vis est une solution

efficace et polyvalente pour le recyclage des plastiques.

3.2.4. Filtration

Dans le processus de recyclage post-consommation des matières plastiques, la filtration de la masse fondue est une étape fondamentale pour garantir la qualité du matériau recyclé. Pendant l'extrusion, le plastique est fondu et doit être purifié des contaminants avant d'être transformé en nouveaux granulés par granulation.

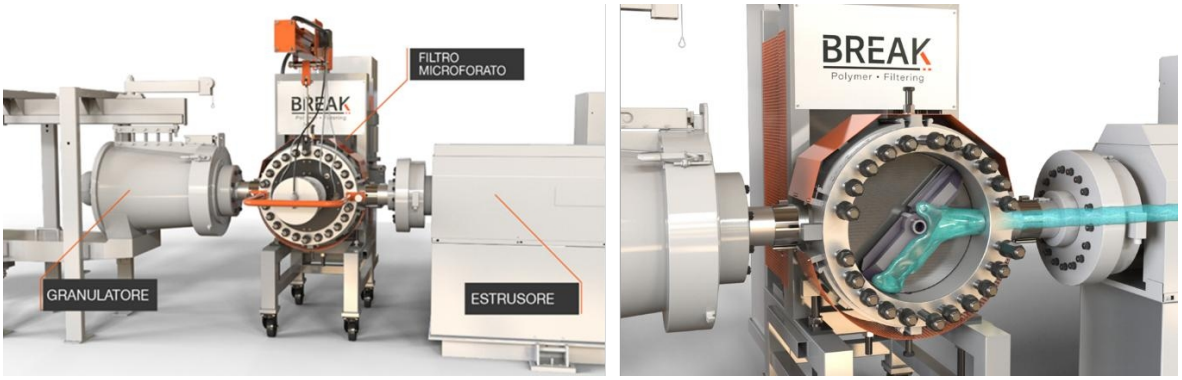

Figure 22 - Filtre avec système de remplacement automatique Break Machinery [47]

Les matières plastiques peuvent contenir des impuretés telles que :

- Papier : par exemple, des étiquettes non retirées.
- Aluminium : particules résiduelles.
- Bois, caoutchouc et plastiques non fondus : fragments indésirables.

La présence de ces impuretés peut compromettre les propriétés du matériau recyclé, rendant nécessaire une filtration efficace pendant l'extrusion.
Parmi les techniques les plus utilisées, on trouve :

- Filtres à disque ou à mailles :
  - Manuels : ils nécessitent l'interruption du processus pour le remplacement des filtres.
  - Automatiques : ils permettent de remplacer les filtres sans interrompre la production, ce qui améliore l'efficacité. Généralement composés de deux filtres en parallèle, lorsque le remplacement du filtre de la première machine s'avère nécessaire, le flux de cette branche de la ligne est interrompu et la production se poursuit uniquement sur l'autre branche, reliée au deuxième filtre.
- Filtres continus (à piston ou à double piston) : ils utilisent des pistons mobiles pour nettoyer ou remplacer une partie du filtre tandis que l'autre continue de fonctionner, garantissant ainsi une production ininterrompue.
- Filtres autonettoyants : ils inversent la pression pour expulser les impuretés accumulées, ce qui réduit la nécessité de remplacements fréquents et permet de maintenir une qualité constante du produit.

Figure 23 – Flux de matière dans un système de filtration en continu

La qualité du matériau en aval dépend principalement de trois paramètres :

- Maillage du filtre : il détermine la taille des particules pouvant être éliminées ; des mailles plus fines retiennent les impuretés plus petites mais peuvent réduire le débit du matériau.
- Température : elle influence la viscosité du plastique fondu ; des températures optimales facilitent l'écoulement à travers le filtre sans dégrader le matériau.
- Pression différentielle : différence de pression entre l'entrée et la sortie du filtre ; une augmentation indique un colmatage et nécessite une intervention.

Le contrôle précis de ces paramètres est essentiel pour maintenir l'efficacité du processus et la qualité du matériau recyclé.

3.2.5. Granulation (humide, sèche)

La granulation des matières plastiques est une étape cruciale du processus de recyclage, car elle permet de transformer les déchets plastiques en granulés homogènes et de haute qualité, prêts à être réutilisés dans les processus de production ultérieurs. Ce processus peut être réalisé à l'aide de deux technologies principales : « wet » (humide) et « dry » (à sec).
La technologie de granulation à sec consiste à couper le matériau extrudé sous forme de filaments en granulés à l'aide de lames rotatives.
Les principaux avantages de cette technologie sont les suivants :

- Une consommation d'eau réduite, ce qui implique une plus grande durabilité et suppose que les matériaux présentent de faibles niveaux de contamination.
- Meilleure efficacité énergétique grâce à l'absence d'étapes de séchage.
- Processus plus simple et plus direct, avec des besoins réduits en post-traitement.

Cependant, la technologie « à sec » peut s'avérer moins efficace pour traiter les plastiques très sales ou contaminés, qui pourraient nécessiter des prétraitements plus complexes.

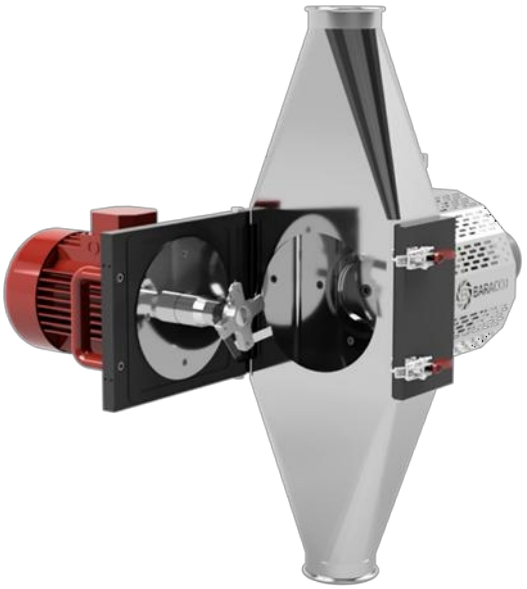

Figure 24 – Granulateur/pelleteur à air de Baracco. [41]

La granulation humide se distingue de la version à sec par l'utilisation d'eau directement lors de la phase de découpe des granulés. Après l'extrusion du matériau à travers une filière, celui-ci est immédiatement découpé en granulés sous un jet d'eau. Ce processus permet un refroidissement rapide et uniforme des granulés, prévenant ainsi d'éventuels défauts de surface et améliorant la qualité du produit final.
Les principaux avantages de la granulation humide sont les suivants :

- Un refroidissement rapide et homogène des granulés, garantissant une forme plus régulière et uniforme.
- Risque réduit d'agglomération des granulés grâce à la présence d'eau.
- Possibilité d'éliminer d'autres impuretés résiduelles au cours du processus.

En revanche, la technologie « humide » nécessite un système de séparation de l'eau des granulés, suivi d'une phase de séchage efficace pour éliminer l'humidité résiduelle. Cela entraîne une consommation d'énergie plus élevée par rapport à la granulation à sec.

Figure 25 – Système de granulation sous eau de Filtec. [36]

Le choix entre la granulation « humide » et « sèche » dépend des caractéristiques du matériau à traiter et des objectifs de recyclage. Alors que la technologie « sèche » est plus efficace sur le plan énergétique et idéale pour les plastiques peu contaminés, la technologie « humide » garantit une meilleure qualité des granulés, ce qui la rend plus adaptée aux matériaux sales ou mélangés. Dans de nombreuses installations, on combine les deux technologies afin d'optimiser le processus et de maximiser le rendement du matériau recyclé.

4. Installation prototype d'expérimentation PLASTRON

Le chapitre 3 a présenté un aperçu des méthodologies et de la séquence opérationnelle couramment adoptées dans les principales installations industrielles de recyclage des plastiques. L'objectif de cette analyse était d'identifier des solutions techniques éprouvées, dont s'inspirer pour la conception d'installations plus petites, économiquement viables et adaptables aux contextes locaux.

On trouve ci-dessous un schéma récapitulatif des principales phases opérationnelles d'une installation fonctionnant en continu, accompagné d'une estimation sommaire des coûts des équipements. Les chiffres ont été estimés sur la base d'entretiens avec des fabricants de machines et se réfèrent à une installation d'une capacité de production de 80 à 100 kg/h.

Les estimations de coûts incluent exclusivement les machines nécessaires aux différentes phases opérationnelles. Ne sont pas pris en compte :

- les systèmes de transport entre les différentes machines (bandes transporteuses, vis sans fin, etc.) ;
- Les composants accessoires (tableaux électriques, capteurs, raccords, etc.) ;
- Coûts liés à l'infrastructure (bâtiment, fondations, installations techniques générales) ;
- Systèmes de traitement et d'épuration des eaux.

Cette simplification vise à mettre en évidence la contribution directe de chaque phase au dimensionnement de l'installation, en fournissant une base de référence pour la construction du dispositif expérimental à petite échelle.

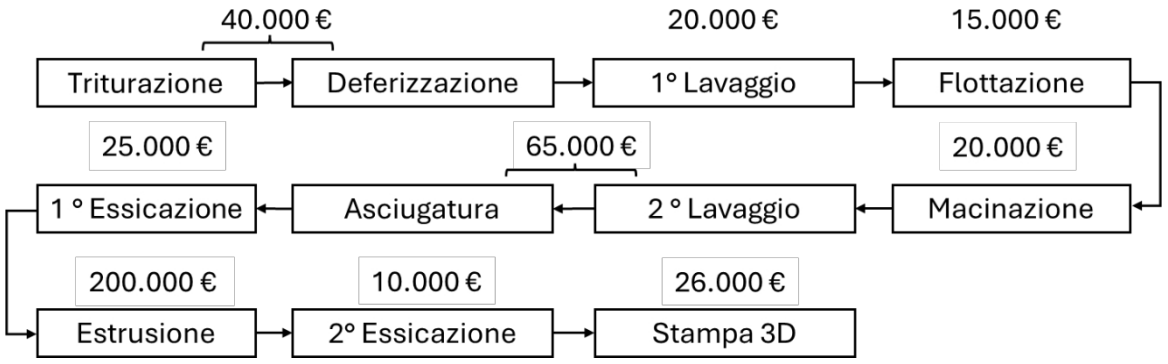

Figure 26 – Étapes opérationnelles de l'installation à petite échelle

Dans le cadre de l'expérimentation, une mini-installation pilote a été conçue, dans laquelle les phases opérationnelles ont été simplifiées et réorganisées dans le temps afin d'obtenir une ligne de processus plus rationnelle, cohérente avec le budget disponible et adaptée aux objectifs expérimentaux. L'approche adoptée a également prévu une réduction de la productivité horaire des machines par rapport à celle prévue pour l'installation à plein régime, permettant ainsi une réduction des coûts et une plus grande adaptabilité du système.

Bien que cette configuration implique une efficacité globale moindre (liée au passage d'une production en continu à une production par lots intermittente et à la réduction de productivité qui en découle), une plus grande flexibilité opérationnelle est garantie. Cette flexibilité permet de traiter différents types de matériaux, en utilisant les mêmes équipements reconfigurés en fonction des besoins expérimentaux, et s'avère donc particulièrement adaptée à la phase de test et de développement.
La mini-usine sera installée dans l'usine de recyclage du partenaire Revet, un choix motivé par des exigences

réglementaires et d'autorisation. L'installation sur le site de Revet permet en effet de réduire les délais administratifs et d'assurer la conformité aux réglementations en vigueur, en évitant des procédures d'autorisation qui auraient pu compromettre le démarrage des activités dans les délais prévus par le projet.

Il convient de noter que le matériau obtenu devra être adapté à l'alimentation de l'extrudeuse dédiée au compoundage, comme décrit au paragraphe 2.1. En particulier, l'extrudeuse actuellement disponible dans la configuration expérimentale est une Eur.ex.ma X-TWIN S - 40 D (cf. paragraphe 4.3.1), qui nécessite une matière première sous forme de flocons dont les dimensions sont comprises entre 3 et 5 mm.

Les installations standard de lavage (cf. paragraphe 4.3) sont conçues pour traiter des matériaux dont la taille n'est pas inférieure à 10 mm, à l'aide de grilles qui ne retiennent que les flocons de taille suffisante. Cette spécification technique a été soigneusement prise en compte lors de la conception des phases de broyage et de concassage, afin de garantir la compatibilité avec les deux exigences de l'installation.

Sur la base de ces considérations, un cycle opérationnel a été envisagé, articulé selon une séquence logique et fonctionnelle, résumée ci-dessous et décrite en détail dans les chapitres spécifiques, tant en ce qui concerne les opérations que les machines utilisées :

1. Séparation manuelle des matériaux (cf. paragraphe 4.2.1)
2. Broyage préliminaire pour le lavage à l'aide d'un broyeur configuré comme un concasseur (cf. paragraphe 4.2.2)
3. Traitement dans le système de lavage (cf. paragraphe 4.2.3)
4. Séchage du matériau lavé
5. Broyage final pour obtenir des flocons de la taille nécessaire à l'extrusion
6. Séchage final et alimentation de l'extrudeuse

La séquence opérationnelle complète est représentée à la figure 27, où chaque étape est associée à la machine spécifique utilisée dans la mini-usine de recherche.

Il convient de souligner que, pour un bon fonctionnement de l'impression 3D, il est nécessaire d'éviter la présence de résidus solides dans les granulés ; il est donc important de procéder à une déferrisation des déchets, un processus de prétraitement mécanique visant à séparer les matériaux ferreux d'un flux de déchets (urbains, DEEE, inertes) à l'aide d'aimants permanents ou d'électroaimants. En cas d'utilisation d'additifs, pour la même raison, il est nécessaire de les tamiser avec un maillage approprié avant de réaliser le composé.

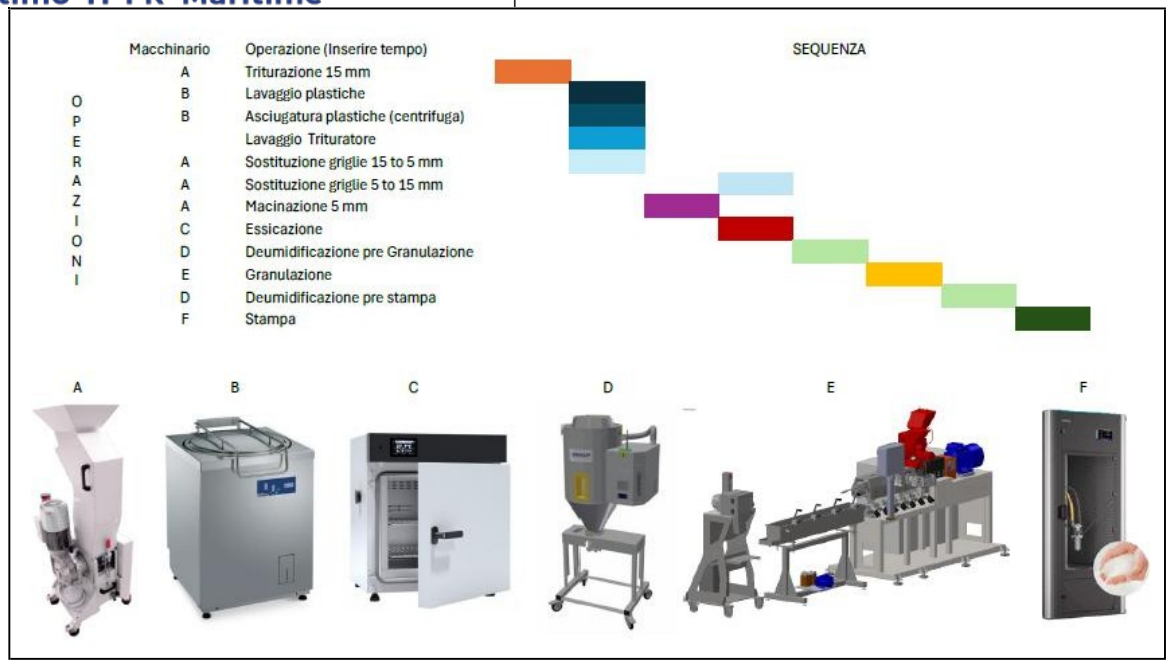

Figure 27 – Séquence hypothétique des opérations dans une installation expérimentale A) Broyeur B) Laveur C) Séchoir D) Déshumidificateur E) Ligne de granulation à sec F) Imprimante 3D

4.1. Tri

Après la collecte, les plastiques seront répartis en trois catégories : polyoléfines, PET et autres plastiques. Le tri préliminaire s'effectuera manuellement par grande catégorie d'emballages dont le type de plastique est connu si l'emballage est encore intact ou identifiable. En revanche, pour les matériaux ne pouvant être rattachés à un emballage ou non identifiables comme faisant partie d'un emballage, le tri pourra être effectué à l'aide de cuves de flottation (annexe 3.1.3) ou de scanners NIR portables, après nettoyage dans un système de lavage. Les matériaux triés et adaptés au processus sont ensuite soumis à un premier lavage à l'aide d'un nettoyeur haute pression. Les flacons sont ouverts en deux et vidés des résidus éventuellement présents à l'intérieur, opération qui peut être effectuée à l'aide de cisailles manuelles de grande taille ou d'un autre outil approprié.

Les bouchons, généralement en HDPE ou en PP, qui sont séparés des flacons pendant le processus de nettoyage, seront traités séparément des contenants, qu'ils soient sans bouchon ou avec le bouchon encore attaché. La précision de la séparation de la fraction détermine la possibilité d'obtenir une matière plastique recyclée de qualité et, par conséquent, présentant une valeur économique significative pour la création de filières.

Les deux flux de matériaux (bouchons et flacons) seront ensuite acheminés vers des cuves contenant de l'eau pour la phase suivante du traitement.
Les cuves utilisées peuvent être des bacs industriels fermés, montés sur roues et équipés d'un système de vidange, facilement disponibles dans le commerce (Fig. 28).

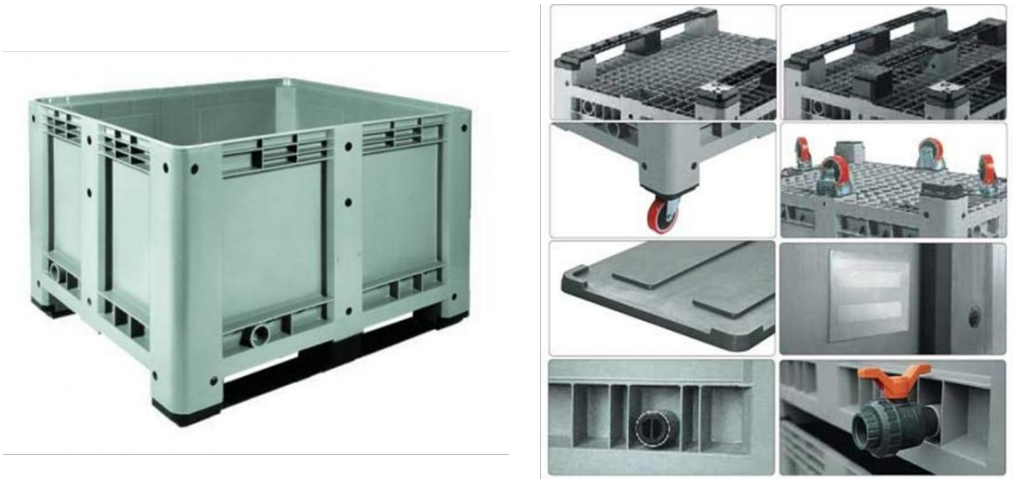

Figure 28 - Conteneur en plastique 1200 x 1000 H 580, d'une capacité de 430 litres, montable sur roues et équipé d'un système de vidange

À l'intérieur des cuves, il est prévu d'insérer un panier en filet à mailles larges avec couvercle, qui pourra être acheté ou fabriqué sur mesure, dont le prix n'est pas encore connu. Le panier remplit une double fonction : d'une part, il permet au sable et aux cailloux de se déposer au fond de la cuve, en les séparant des plastiques tels que le PET qui ont tendance à couler, et d'autre part, il sert de système de drainage et de séchage du matériau, permettant d'éliminer l'excès d'eau et facilitant le séchage à l'air libre.
Ces étapes, qui se déroulent dans différents bassins vidés et remplis d'eau propre lorsque cela est nécessaire, servent également à réduire la teneur en résidus salins, qui pourraient causer des problèmes dans les machines en aval du processus. Après le lavage en cuves, le séchage préalable au transfert/à l'expédition dans l'installation mise en place chez Revet S.p.a. peut être effectué à l'air libre dans des cages disponibles dans le commerce (Fig. 29) ou, à défaut, dans les mêmes cages de drainage que celles des cuves de sédimentation.

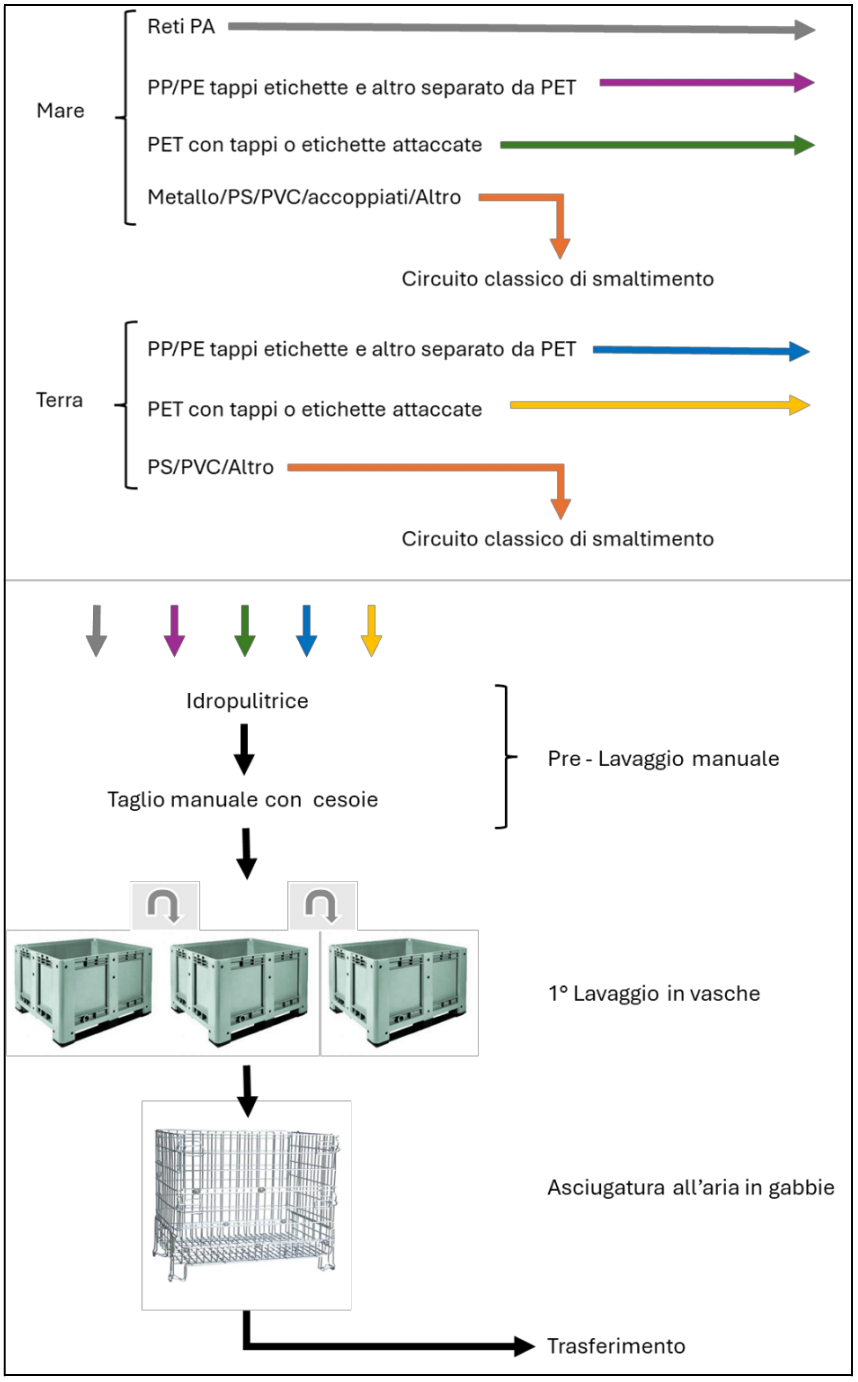

Figure 29 - Schéma récapitulatif du flux de travail

Il est également possible d'envisager une pré-tri par le citoyen qui, bien informé grâce à des infographies, peut décider de trier les différents déchets lors du dépôt dans des poubelles spécifiques, séparées par type de déchets.

Remarque 1 : Utilisation du broyeur en mode déchiqueteuse après le séchage préalable au transfert

Après le séchage pré-transfert, on peut encore envisager d'utiliser le broyeur en configuration de déchiqueteuse pour réduire les volumes de matière plastique. Ce choix pourrait s'avérer avantageux pour

l'optimisation de la logistique, car, à poids égal (kg), le volume de transport serait réduit, ce qui permettrait une utilisation plus efficace de l'espace dans les moyens de transport et réduirait potentiellement les coûts de transport.

Il est toutefois nécessaire d'évaluer la rentabilité de cette opération. En particulier, si l'on opte pour la réduction par broyage, il faut tenir compte des coûts de transfert du broyeur de l'usine Revet vers les sites pilotes et retour, ainsi que des temps d'arrêt de la machine pendant le transport. Ces facteurs pourraient influencer la rentabilité globale de l'opération.

Remarque 2 : Évolutivité de l'opération de séparation :

De toutes les opérations, c'est celle-ci qui présente la plus grande complexité en termes d'évolutivité. Il est évident qu'il est difficile d'adopter cette méthode de travail lorsqu'il s'agit de traiter des volumes plus importants, comme ceux d'une commune telle que Stintino ou Île-Rousse. Il est donc nécessaire de délocaliser autant que possible la phase de tri en amont, en la confiant directement au consommateur/déclareur dûment informé. Grâce à une implication informative efficace, ce dernier devient un acteur actif d'un processus capable de valoriser les déchets, comme le montre également le projet européen BLUISLAND [48].

On peut donc envisager une collecte optimisée, réalisée à l'aide de conteneurs spécifiques et clairement signalés, de sorte que les matériaux entrant dans l'installation de proximité ne nécessitent qu'un simple contrôle, puisqu'ils ont déjà été correctement triés.

4.2. Réduction de la taille des matériaux

Après le transfert, les matériaux entrant dans l'installation pilote subiront une opération de broyage, tout en maintenant séparés les flux de matériaux décrits ci-dessus.

Le choix du type de matériaux à traiter, tels que les bouteilles en PET et les emballages en PE et PP, a conduit à la sélection d'un broyeur à lames à chambre tangentielle, particulièrement adapté à ce type de matériaux : il s'agit en effet de matériaux peu épais, durs mais volumineux, qui nécessitent un broyage pour pouvoir être traités par la suite.

Pour le prélavage, le broyage est effectué à l'aide du broyeur, configuré avec une grille de 20 mm, afin d'obtenir un matériau dont la taille est supérieure à 10 mm. Le matériau broyé est ensuite tamisé à l'aide d'un tamis perforé pour éliminer les particules trop petites qui pourraient s'échapper et être rejetées dans les eaux de lavage, évitant ainsi d'éventuels engorgements et dysfonctionnements du système.

Par la suite, après le lavage et le séchage, le matériau est encore réduit en taille. À ce stade, on utilise le même broyeur que celui utilisé lors de la phase précédente et qui, pendant les opérations de lavage et de séchage, est nettoyé et préparé pour recevoir le matériau propre. Le broyeur est équipé d'une grille de 3 à 5 mm afin d'obtenir une granulométrie adaptée à l'extrudeuse, et, dans ce cas également, le matériau est tamisé avant de passer à l'étape de séchage.

Le choix des machines a été effectué après analyse des équipements disponibles sur le marché et prise de contact avec des entreprises opérant en Italie, telles que CMG, TRIA, SIMATEC, MORETTO.

La décision finale a porté sur l'achat de machines déjà utilisées pour le broyage de matériaux post-consommation primaires, mais qui ont été jugées adaptées aux besoins du projet, après adoption de certaines modifications et précautions spécifiques dans le processus lorsque cela s'avérait nécessaire. les tailles des broyeurs varient en fonction de la dimension de la bouche de chargement, qui détermine la dimension de la chambre de coupe, d'où découlent une productivité (kg/h) et une dimension maximale des matériaux pouvant être introduits, comme expliqué aux points 2.1.1 et 2.1.2.

La solution requise a donc dû trouver un compromis entre la taille maximale du matériau pouvant être traité et la puissance de la machine, qui détermine son coût et sa productivité.

Après avoir pris contact avec *CMG, TRIA, SIMATEC et MORETTO :*

Moretto, à qui nous avons demandé la machine GMK Kastor, nous a déconseillé son utilisation car elle n'aurait pas été en mesure de garantir les normes pour lesquelles elle a été conçue.
Tria nous a fait parvenir un devis pour deux solutions : les machines JM 4220 et JM 3220. Les deux solutions proposées se distinguent par les dimensions de la chambre de découpe et sont dérivées de machines montées sur presse pour la production de flacons, équipées de lames linéaires à trois rotors et deux stators.
CMG a proposé deux solutions : la CMG G26-45, une machine surdimensionnée par rapport à nos besoins et hors budget, et un modèle plus compact, la CMG G25-30, dont le coût est également supérieur à celui de la machine Tria équivalente.
Simatec nous a proposé deux machines très compactes qui se distinguent par leur chambre de coupe et, par conséquent, par leur production, ainsi que par leur équipement en lames, à savoir 9 lames rotatives décalées et 2 lames statiques, ce qui permet une meilleure prise du matériau et une consommation d'énergie réduite. La décision visait à trouver un équilibre entre la productivité de la machine que nous recherchions (10/20 kg/h) et la taille des matériaux pouvant être introduits, en évaluant une sélection de matériaux d'entrée comprenant des bouteilles et des flacons de détergents ou des matériaux en film ou en filet. Simatec a été identifiée comme la solution optimale, tant en termes de coûts que d'équipements. La machine, une fois achetée, sera testée début mai puis acquise par la suite.

	Modèle	Production	Puissance	Dimensions de la chambre de découpe	Prix de base	Options	Total
	/	kg/h	kW	mm	€	€	€
Simatec	GS 25	30	1,5	180*250	6	318	6000
	GS 35	40	1,5	180*350			0
Tria	JM 3220 SL	40-60	3	320*200	9590	570	10160
	JM 4220 SL	50-80	3	420*200	10550	570	11120
CMG	G 25-30	80-140	4	250*300	13975	0	13975
	G 26-45	120-200	5,5	260*450	18728	0	18728

Tableau 3 - Offres de broyeurs

Évolutivité de l'opération de réduction de la taille des morceaux :

La scalabilité de cette opération ne semble pas particulièrement critique. L'analyse des équipements disponibles sur le marché, en particulier sur le marché italien, a montré que les fabricants, tant ceux déjà mentionnés que d'autres, proposent une large gamme de machines aux dimensions évolutives. Il conviendra également d'évaluer l'adoption d'un double système de réduction de la taille des particules, qui pourrait également inclure l'utilisation d'un granulateur humide, si les caractéristiques du matériau l'exigent. Parmi les autres entreprises non encore mentionnées, on peut citer PRT Innovation. [48]

4.3. Lavage et séchage après broyage

Le processus de lavage et de séchage mécanisé à petite échelle a été prévu en post-

transformation. L'organisation du travail par lots, avec de petites quantités, a nécessité la recherche d'une machine compacte capable d'effectuer les deux opérations. Cependant, l'identification d'une machine industrielle répondant à cette exigence s'est heurtée à certaines difficultés, car il n'est pas facile de trouver un appareil conçu pour effectuer simultanément ces deux opérations sur de petits lots et à un prix abordable. Ce problème tient au fait que les machines industrielles sont généralement conçues pour fonctionner en ligne, chaque machine étant dédiée à une seule activité, tandis que le matériau est transféré d'une machine à l'autre au cours du processus de production.

L'achat de deux machines industrielles pour effectuer séparément les deux opérations a été écarté, car le coût élevé de cette solution d'installation ne justifiait pas la productivité élevée, qui n'était pas nécessaire au stade de la recherche. Le coût prévu pour l'achat d'une machine à laver verticale et d'une essoreuse verticale à cycle par lots était d'environ 65 000 €, sur la base de technologies fournies par des entreprises spécialisées et d'un devis sommaire.

La recherche d'une solution s'est donc orientée vers une machine capable d'effectuer les mêmes opérations, mais qui soit également utilisée dans d'autres secteurs. L'utilisation d'une machine à laver domestique classique a d'abord été envisagée, mais les problèmes potentiels d'usure et de dysfonctionnement liés à sa conception pour un usage domestique ont conduit à la recherche d'une alternative plus adaptée. La solution retenue a été un lave-légumes, une machine couramment utilisée dans le secteur de la restauration. Grâce à sa construction simple, aux matériaux utilisés et aux normes d'hygiène auxquelles elle répond, cette machine a été jugée capable de résister aux agressions chimiques des composés et des détergents susceptibles d'être utilisés, tout en étant facile à nettoyer.

Après avoir évalué certaines solutions disponibles sur le marché, telles que les produits Electrolux et Fimar, le modèle Electrolux LVA 100 a été retenu comme solution valable.

Figure 30 - Lave-légumes Electrolux LVA 100

La machine (Figure 30) est fabriquée en acier inoxydable AISI 304 et occupe un espace d'installation d'environ 1 m² (Figure 31). La cuve de lavage de 30 litres est équipée de six buses, trois disposées radialement et trois verticalement. Le panier d'une capacité d'environ 3 kg est introduit dans la cuve de lavage par le haut et est composé d'une grille à mailles carrées de 5 x 5 mm, permettant le traitement des matières à la sortie de la phase de broyage envisagée. Le lavage peut s'effectuer soit par immersion, soit par pulvérisation, avec une vitesse de rotation maximale d'environ 60 tr/min, avec la possibilité de choisir parmi 3 cycles de lavage de base et d'ajuster les vitesses et les

durées de travail des phases. Les cycles utilisent de l'eau froide et il n'y a pas de dispositif pour chauffer l'eau à l'entrée de la chambre de lavage ; si l'utilisation d'eau chaude s'avère nécessaire pour des cycles de lavage plus difficiles, un chauffe-eau électrique intégré à la machine peut être prévu pour son approvisionnement. Un réservoir de 500 ml est également fourni pour l'introduction automatique de désinfectant ou de détergent, une caractéristique intéressante pour notre utilisation afin d'introduire des détergents non moussants ou des solutions légèrement acides pour détartrer et dégraisser les plastiques.

L'évacuation par gravité de l'eau est directe et automatique, sans filtres ni systèmes de pompage, ce qui rend la machine apte à fonctionner en présence de contaminants solides tels que du sable, des petits cailloux ou des fragments de coquilles. Une douchette latérale est fournie pour le nettoyage de la chambre de lavage en fin de cycle. La machine proposée intègre une fonction d'essorage avec une vitesse maximale de 270 tr/min qui permet d'éliminer l'eau de surface en fin de cycle. L'encombrement au sol est de 696 x 696 mm.

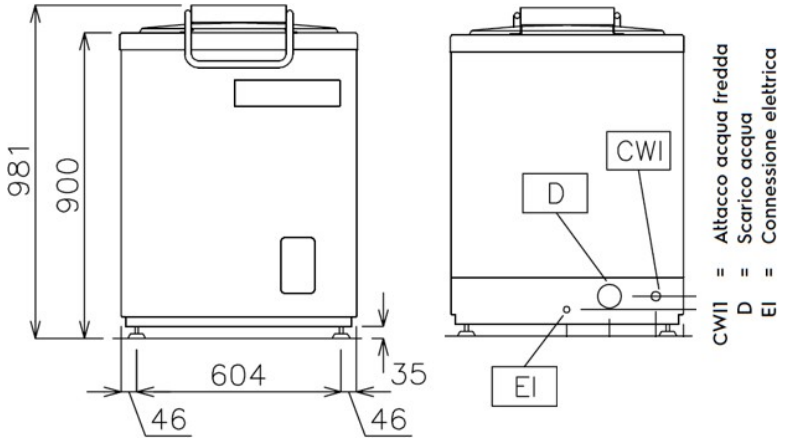

Figure 31 - Dimensions et caractéristiques de l'Electrolux LVA 100

Le tableau 3 présente les offres des fournisseurs de l'équipement.

Modèle	Fournisseur	Offre (€) (hors TVA)
Electrolux LVA 100	Errepi grandimpianti	6684
Electrolux LVA 100	GF_impianti	7049
Electrolux LVA 100	Agent Electrolux (Luca Vitale)	6076,5

Tableau 4 - Devis pour la machine à laver

Après le cycle d'essorage visant à éliminer l'eau de surface, le séchage du matériel sera effectué à l'aide d'un four Argolab de 50 litres.

Figure 32 - Étuve Argolab 50

L'étuve TCF 50 NEW à ventilation forcée d'ArgoLab, déjà présente chez la société Revet S.p.a., est conçue pour garantir un contrôle précis et uniforme de la température, ce qui la rend idéale pour les applications de laboratoire exigeant fiabilité et efficacité.
Grâce à la ventilation forcée réglable sur trois niveaux :

- High (100 %)
- Moyen (75 %)
- Faible (50 %)

elle assure une répartition optimale de la chaleur, réduisant considérablement les temps de chauffage (jusqu'à 150 °C en 20 minutes).
La programmation avancée permet de mémoriser jusqu'à 8 programmes de 8 étapes chacun et d'utiliser un programme de base à une seule étape ou un programme à plusieurs étapes pouvant compter jusqu'à 64 étapes au total.
Le panneau de commande intuitif permet l'affichage simultané de tous les paramètres, avec possibilité de démarrage différé et minuterie numérique réglable de 1 minute à 99 heures et 59 minutes, même en mode continu. Des alarmes visuelles et sonores désactivables par l'opérateur ainsi qu'une fonction de température de sécurité sont présentes pour protéger les échantillons.
L'enregistrement des données de travail est possible sur clé USB, avec jusqu'à 2 167 valeurs mémorisables. La chambre interne en acier inoxydable de 50 litres est conçue avec des angles arrondis pour faciliter le nettoyage, et est équipée de deux étagères grillagées anti-basculement et entièrement amovibles (charge maximale de 15 kg chacune). Un interrupteur de porte facilite les opérations de chargement et de déchargement.
Autres caractéristiques techniques principales :

- Dimensions extérieures (L x P x H) : 690 x 640 x 635 mm
- Dimensions intérieures : 400 x 310 x 410 mm
- Poids : 54 kg
- Puissance absorbée : 980 W
- Alimentation : 230 V

Évolutivité de l'opération de lavage et de séchage :

Si l'on souhaite adapter l'opération de lavage et d'essorage, il est possible de trouver des solutions de lavage telles que les machines Tecnofer LO20 ou Italrec [49] HRC PLUS ou LB2/LB4, dont les prix catalogue ne sont toutefois pas encore disponibles.
Pour l'essorage/le séchage, on trouve en revanche le séchoir centrifuge vertical CV250/3 Filtec, dont le prix catalogue (2025) est de 23 537,18 €, comprenant les systèmes d'entrée et de sortie du matériau. Une autre

alternative intéressante, mais pour laquelle nous n'avons pas eu de réponse de la part de l'entreprise, est la centrifugeuse dynamique CD720X1500 Tecnofer qui combine lavage et séchage en une seule fourniture.

4.4. Séchage et déshumidification

Le séchage/la déshumidification du matériau a été intégré à la fois à la pré-extrusion et à la pré-impression (fabrication additive), car le matériau sec, s'il est stocké et utilisé après quelques heures, peut absorber l'humidité de l'air et poser des problèmes lors de l'extrusion ; cela vaut également pour le matériau avant son impression. Il a été envisagé d'utiliser une seule machine pouvant, si nécessaire, servir à la fois pour ces deux opérations, un choix rendu possible par le fait que la production du matériau et l'impression ne seront pas effectuées simultanément.
Comme expliqué en détail au point 2.1.5, le choix entre la déshumidification et le séchage dépend de la nature du matériau et, contrairement au séchage, la déshumidification convient à tous les matériaux. C'est pourquoi, dans notre cas, la recherche d'équipement s'est orientée vers l'identification d'un déshumidificateur.

Nous avons contacté des entreprises telles que Moretto, Simatec et New Omap et avons évalué la meilleure offre à performances égales parmi les machines proposées :

Déshumidificateur				
	Modèle	Volume/poids	Puissance	Prix de base
	/	Litres ; kg	kW	€
Simatec	Unité sur châssis SD4-28/H15+TR1/S	15 ; 7	1,5	3 100,00 €
	Unité sur châssis SD4-28/H25+TR1/S	25 ; 12	1,5	3 310,00 €
Moretto	X -COMB Mini dryer 230/1/50-60	12 ; 6	/	6 313,46 €
	Mini-sèche-cheveux X COMB	24 ; 12	/	12 832,91 €
New Omap	WDC.E15 MT-30	30 ; 15	2,8	5 835,00 €

Tableau 5 - Offres de déshumidificateurs

Le choix s'est porté sur le modèle *WDC.E15 MT-30 New Omap (33).*

Figure 33 – Déshumidificateur New Omap WDC.E15 MT-30

La série de déshumidificateurs WD repose sur l'utilisation d'un tambour rotatif imprégné de gel de silice, dont la rotation permet de fonctionner avec des valeurs de point de rosée pratiquement constantes tout au long du cycle de travail. Elle est équipée d'un échangeur de chaleur à recirculation capable de récupérer la chaleur et d'augmenter l'efficacité de 30 %.
% et pouvoir fonctionner à des températures comprises entre 70 et 150 °C. Les machines sont conçues pour être montées directement sur la machine ou placées sur des chariots, ce qui permet de les déplacer et de ne pas les fixer à une machine, comme c'est le cas ici. Nous avons opté pour une machine de 30 litres dont l'encombrement au sol est de 580 x 650 mm.

L'évaluation du volume de travail a été effectuée en fonction de la taille du lot de production qui sera traité à partir de l'opération de séchage, c'est-à-dire en accord avec les volumes de production des équipements déjà présents.
Parmi les principales caractéristiques, on trouve :

- Fonctionnement automatique avec programmateur journalier/hebdomadaire
- Soufflerie à canaux latéraux à haute pression avec variateur pour la modulation du débit
- Tambour de mélange à tamis moléculaires avec entraînement par chaîne pour une rotation constante et contrôlée
- Dimensions compactes, mais avec de grands espaces intérieurs pour un entretien optimal
- Commande avec fonction Energy pour réduire la consommation d'énergie grâce à un fonctionnement à point de rosée constant prédéfini
- Fonction automatique RCE pour le traitement des matériaux en mode anti-stress

Évolutivité des opérations de séchage et de déshumidification :

La modulabilité de l'opération avec ces machines est extrêmement simple, car elles sont produites par les mêmes entreprises mentionnées précédemment dans une large gamme de formats, avec des trémies et des capacités de traitement modulables en fonction des besoins spécifiques.
Il convient également de souligner que la mise en place d'un système de déshumidification n'est pas toujours nécessaire. En effet, si le matériau est commercialisé sous forme de granulés, les flocons sortant du séchoir sont ensuite traités par une extrudeuse équipée d'un densificateur, qui a pour fonction d'éliminer l'humidité résiduelle piégée. Dans ce cas, en adoptant un système de coupe « dry cut », le granulé à la sortie sera déjà sec ; il appartiendra alors à l'utilisateur final de le déshumidifier davantage, s'il le juge opportun.
Toutefois, il peut être utile de prévoir un système de déshumidification dans la zone de stockage, afin d'éviter la dégradation du matériau mal conservé.
En revanche, la déshumidification est indispensable à bord des imprimantes 3D, qui peuvent être équipées chacune d'un système dédié d'une capacité standard de 10 litres.

4.5. Gestion des eaux usées et approvisionnement énergétique

La gestion des eaux usées, tout comme celle de l'approvisionnement en eau pendant les phases de recherche du projet, n'est pas un aspect pertinent à ce stade, car les activités se dérouleront au sein du département de recherche et développement de notre partenaire (CISPEL/Revet), qui fait partie d'une plus grande usine de recyclage de polyoléfines disposant en aval de sa propre station d'épuration interne pour les eaux usées générées par le processus de lavage et facilement raccordée au réseau électrique national. Nous n'avons donc pas approfondi dans le présent rapport la manière dont nous comptons aborder ce problème, car cela n'est pas strictement nécessaire à ce stade, où nous avons évalué l'achat des équipements nécessaires pour le moment.
La problématique qui se pose lorsque l'on souhaite implanter cette installation dans une commune ne disposant pas de son propre système d'épuration devra être approfondie, en évaluant la faisabilité technique et réglementaire.

4.6. Compoundage et granulation

En ce qui concerne les opérations d'extrusion et de granulation, la ligne de granulation Eur.Ex. Ma (Fig. 35), équipée d'une extrudeuse à double vis Eur.Ex. Ma X-TWIN S (Fig. 34), sera utilisée. Cette machine, déjà présente dans l'usine de R&D de la société Revet, est un équipement pilote haute performance conçu pour le traitement avancé des polymères, en particulier pour le compoundage et l'extrusion de matériaux techniques et de composites.

Figure 34 - Eur.ex.ma X-TWIN S - 40 D [50]

Il s'agit d'un outil hautement polyvalent et modulaire, développé pour des applications de recherche et développement et pour la production de petites et moyennes quantités de matériaux.
La gamme présente les caractéristiques suivantes :

- Double vis co-rotative de 22 mm de diamètre, rapport L/D 40:1 : garantit un mélange intensif et contrôlé grâce à deux zones de mélange le long des vis.
- La présence de huit zones de chauffage permet un contrôle précis de la température tout au long du processus. Dans toutes les zones, la température est contrôlée par un système de refroidissement à eau.
- Présence de deux zones de dégazage : une zone ambiante plus en arrière et une zone forcée avec un système de vide poussé plus proche de la filière. Celles-ci permettent d'obtenir un granulé exempt d'humidité interne et d'évacuer les éventuels gaz de dégradation pouvant se former tout au long du processus d'extrusion.
- Système d'alimentation principal : volumétrique avec système monovis pour le dosage de granulés, densifiés ou broyés.
- Système d'alimentation latérale volumétrique : pour l'ajout simultané de poudres, de renforts, d'additifs, de pigments, etc. Il s'insère au niveau de la quatrième zone de chauffage et est particulièrement utile pour l'ajout de charges minérales ou de matériaux thermolables.
- Filière à 4 trous de 4 mm : permet d'extruder même des matériaux assez grossiers avec de bons débits et une taille de granulé à la lame pouvant varier, selon les conditions de fonctionnement, de 2 à 5 mm.

- Granulateur : Le système comprend un dispositif de refroidissement constitué d'un réservoir à circuit fermé, relié à un échangeur de chaleur qui garantit le maintien constant de la température du fluide de refroidissement (eau) pendant tout le processus d'extrusion. Le réservoir est également équipé d'un surpresseur à air comprimé qui permet un séchage efficace du matériau après immersion. Le système de coupe est indépendant et composé d'une étoile de coupe rotative, avec possibilité de régler la longueur de coupe. Pour compléter le tout, un système supplémentaire de refroidissement et de séchage à l'air comprimé est présent.
- Débits types : débit maximal de 10 kg/h, idéal pour une échelle de laboratoire ou préindustrielle.
- Contrôle numérique avancé : pour la température, le couple, la vitesse, la pression et d'autres paramètres.
- Encombrement de la ligne (L*L*H) mm : 4775*3000*2000

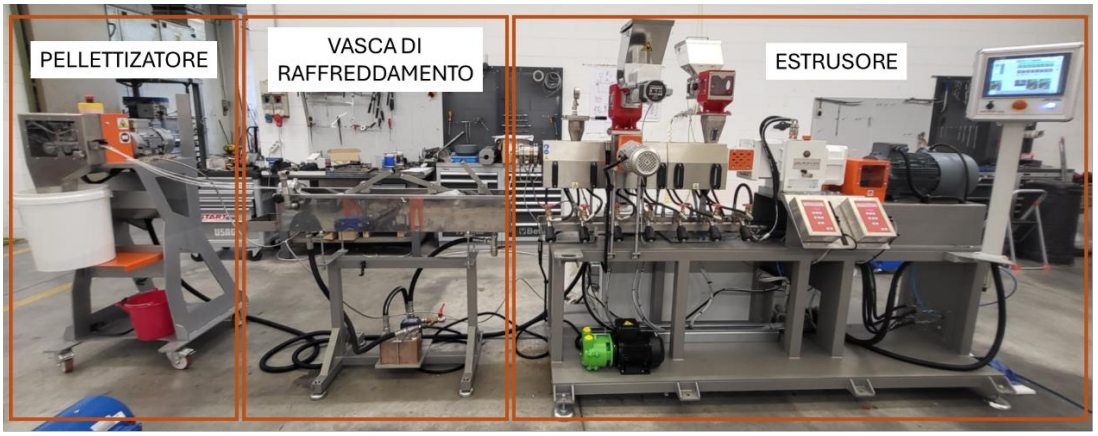

Figure 35 - Ligne de granulation Eur.Ex. Ma

Cet équipement sera très utile dans le cadre du projet Plastron, car il nous permettra de produire en quantités importantes des matériaux composites constitués de :

- de plastiques récupérés en mer
- Plastiques ramassés sur les plages lors des opérations de nettoyage
- Des plastiques issus des activités touristiques sur le littoral
- Déchets agricoles de la zone concernée (poussières)

variables au cours du projet. Grâce à ses caractéristiques, il sera possible d'obtenir un granulat de haute qualité qui permettra d'alimenter l'imprimante 3D Wasp et de fabriquer les objets en plastique décrits dans le projet.
La ligne n'est pas équipée de filtres de pré-extrusion.

Évolutivité du processus d'extrusion et de granulation :

L'évolutivité de l'installation ne présente pas de complexité particulière d'un point de vue technologique, ni en ce qui concerne la disponibilité de machines adaptées aux faibles volumes de production. Cependant, les principales difficultés apparaissent en termes de rentabilité économique. Les différences de coût entre les machines à petite échelle et celles de capacité moyenne ne sont pas particulièrement marquées : cela s'explique par le fait que la technologie utilisée, qui est au cœur du processus de recyclage, a un coût initial fixe très élevé, tandis que l'augmentation de prix associée à une hausse de la productivité n'est pas proportionnelle.
Pour mieux comprendre cette dynamique, on peut prendre le cas spécifique des extrudeuses. Une extrudeuse de laboratoire, d'une capacité d'environ 10 kg/h, a un coût actualisé à fin 2024 de 170 000 €.

cette échelle, une installation industrielle compacte, telle que la Mini 60 de Tecnova, conçue pour traiter les polyoléfines avec une capacité de 80 à 100 kg/h et équipée d'un broyeur et d'un densificateur intégrés, présente un coût d'environ 250 000 €. Cet exemple montre que, à technologie égale, l'augmentation de l'échelle de production entraîne une hausse de coût modérée par rapport au bond en capacité opérationnelle.

4.7. Évaluation du matériau : processus d'utilisation des granulés

À ce stade du projet, il est essentiel d'évaluer les propriétés des matériaux produits, en particulier leurs propriétés mécaniques et d'imprimabilité, afin de vérifier leur réelle aptitude à l'utilisation dans des contextes de production. À cette fin, des tests de transformation seront menés sur plusieurs fronts, avec des essais comparatifs entre l'impression 3D et le moulage par injection. Grâce à l'équipement du laboratoire, il sera possible d'effectuer des tests fonctionnels directement avec l'imprimante 3D WASP 4070 HDP (modèle personnalisé pour l'utilisation de matériaux recyclés), et de comparer les résultats avec ceux obtenus à l'aide de la presse à injection HAITIAN MA 900 III, utilisée pour réaliser des échantillons pouvant être soumis à des essais de traction. Cette approche permettra d'analyser de manière comparative les performances mécaniques des matériaux. Les matériaux utilisés, constitués principalement de mélanges de polyoléfines (LLDPE/LDPE, HDPE et PP), présentent des comportements très similaires, de sorte qu'ils peuvent être regroupés sous un modèle polymère unique pour les phases de test.

L'imprimante WASP 4070 HDP représente une solution avancée pour la fabrication additive avec des polymères difficiles, y compris des matériaux recyclés ou non raffinés, réputés complexes à travailler. Ces matériaux présentent une série de problèmes, notamment un taux de retrait élevé, une tendance à la délamination entre les couches, une mauvaise adhérence au plateau d'impression (warping), la génération de fumées et d'odeurs désagréables pendant l'extrusion et le colmatage de la buse causé par des résidus présents dans les granulés broyés. La 4070 HDP répond à tous ces défis grâce à une série de solutions technologiques intégrées, visant à améliorer à la fois la qualité d'impression et la gestion des matériaux.

Le cœur de la machine est une extrudeuse à vis dotée de deux zones de température indépendantes, qui permettent de contrôler avec précision la durée et le type d'exposition à la chaleur du matériau. Cela permet un chauffage optimal du polymère en fonction de la géométrie de l'objet à imprimer, prévenant ainsi les phénomènes de délamination sans pour autant atteindre des températures trop élevées. Pour compléter le système, la chambre d'impression est chauffée afin de ralentir le retrait du matériau et de réduire les déformations pendant le processus. Bien que les polymères traités ne soient pas excessivement hygroscopiques, l'utilisation d'un système de déshumidification s'est avérée particulièrement utile pour stabiliser le matériau, améliorer la qualité d'impression et prévenir les défauts tels que les bulles, la sous-extrusion et les déformations involontaires. La machine peut également être équipée d'un système à vide qui permet de sélectionner le plateau d'impression le mieux adapté au matériau utilisé. Des surfaces en ABS, PP et acier revêtu de PEI sont disponibles : en particulier, les matériaux tels que le LLDPE/LDPE, le HDPE et le PP nécessitent l'utilisation exclusive du plateau en PP pour garantir une bonne adhérence, un détachement facile et un fonctionnement optimal même à basse température (0–30 °C).

La chambre fermée, équipée de filtres EPA, permet de contenir efficacement les fumées et les odeurs émises pendant le processus d'impression, améliorant ainsi la salubrité de l'environnement de travail. La 4070 HDP est également conçue pour utiliser des buses de 1 mm et 2 mm : la buse de 2 mm élimine complètement le risque de colmatage avec des granulés qui ne sont pas parfaitement propres, tandis que les nouvelles formulations de granulés permettent dans de nombreux cas une utilisation fiable même de la buse de 1 mm, sauf dans de rares cas. Enfin, la présence d'un système d'extrusion à vis permet le mélange direct d'additifs, tels que des colorants ou des modificateurs, dans la chambre chaude de l'extrudeuse. Cette fonctionnalité a été testée avec succès lors de la coloration de granulés gris avec un pigment performant à 4–5 %, obtenant un résultat homogène et stable. Cette approche est reproductible avec différents matériaux et additifs, en tenant compte des dimensions réduites de la vis et des propriétés spécifiques de chaque composant.

En résumé, l'imprimante 4070 HDP se présente comme une machine extrêmement polyvalente et fiable, idéale pour relever les défis techniques liés à l'impression avec des polymères recyclés, tout en garantissant

des performances, une qualité et une adaptabilité élevées.

5. Conclusions

Les activités menées au cours de cette phase du projet ont permis de définir une base technique solide pour le développement d'un système de valorisation des plastiques post-consommation à kilomètre zéro, avec un accent particulier sur les fractions de polyoléfines (PP-PE) et de PET. L'étude de l'état de l'art a permis d'identifier les technologies les plus efficaces en matière de recyclage mécanique et d'entamer des discussions avec des entreprises spécialisées dans la conception et la fourniture d'installations, créant ainsi un réseau technico-industriel au service des objectifs du projet.
L'analyse des flux de déchets a fourni des données préliminaires sur les volumes et la composition des matériaux à traiter, jetant ainsi les bases d'un dimensionnement correct de l'installation. Ces données seront notamment essentielles pour les évaluations ultérieures concernant le compoundage des matériaux recyclés. Pour la fraction marine, des données plus précises sont attendues à l'issue des opérations de nettoyage programmées.
Sur la base des besoins identifiés, un agencement de l'installation a été conçu qui tient compte des flux de matériaux, des exigences de sécurité et de l'optimisation de l'espace, et qui se présente comme flexible et évolutif. Des équipements dont la capacité de traitement est conforme aux objectifs expérimentaux (10 kg/h) ont été sélectionnés. Parmi les produits commerciaux capables de répondre aux besoins opérationnels des actions pilotes, on trouve des broyeurs, des installations de lavage, des centrifugeuses et des systèmes d'extrusion.

Il reste quelques points à approfondir concernant :

- la conception des systèmes internes de transport et de stockage des matériaux ;
- la gestion des eaux usées issues du processus de lavage ;
- l'absence d'une évaluation approfondie des besoins énergétiques et des émissions de CO_2 pour évaluer la durabilité (économique et environnementale) de l'installation.

L'installation est conçue pour traiter principalement des mélanges de polyoléfines, mais elle est déjà prévue pour traiter des matériaux tels que le PET et les polyamides (par exemple, les filets de pêche), avec d'éventuelles études de procédé à mener sur demande. L'installation peut être configurée en mode de traitement partiel (broyage et lavage uniquement) ou en mode de traitement complet (y compris la granulation par extrusion), garantissant ainsi une flexibilité opérationnelle.

Les activités réalisées jusqu'à présent constituent une base concrète pour les suivantes, telles que :

- l'évaluation des volumes de déchets plastiques de différents types lors des actions pilotes par cartographie ;
- l'optimisation des flux de processus en fonction des matériaux recensés et des éventuels renforts ;
- la mise en service de la ligne expérimentale – installation prototype ;
- la conception de l'installation à échelle réelle (scale-up) sur la base de l'expérience acquise.

Ces résultats, associés à l'analyse réglementaire transfrontalière, contribueront de manière déterminante à la réalisation des objectifs du projet, en garantissant une approche efficace, adaptable et durable pour la valorisation des plastiques locaux.

Bibliographie

[1] R. Geyer, J. R. Jambeck et K. L. Law, « Production, use, and fate of all plastics ever made », *Sci Adv*, vol. 3, n° 7, juillet 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
[2] G. P. O. E. D. E. I. et P. O. O. P. P. OCDE (2022), *Global Plastics Outlook*. OCDE, 2022. doi: 10.1787/de747aef-en.
[3] PlasticEurope, « Plastics - the facts 2015, Une analyse de la production, de la demande et de la récupération des matières plastiques en Europe pour 2015 », 2015.
[4] PNUE (2009), « Rapport 2009 du Programme des Nations Unies pour l'environnement ».
[5] PNUE 2019, « Limites légales pour les plastiques à usage unique et les microplastiques : un rapport mondial ».
[6] C. Corbau, M. Contini, V. Gazale, A. Lazarou, U. Simeoni et D. Carboni, « Répartition des déchets marins sur les plages de Sardaigne : le cas de Cala dei Ponzesi et de Cala Spalmatore sur l'île d'Asinara », 2020, pp. 194–213. doi: 10.36253/978-88-5518-147-1.20.
[7] J. Čulin et T. Bielić, « Plastic Pollution from Ships », *Journal of Maritime & Transportation Science*, vol. 51, n° 1, pp. 57–66, mars 2016, doi: 10.18048/2016.51.04.
[8] STAP (2011), « Les déchets marins en tant que problème environnemental mondial : présentation d'un cadre axé sur les solutions et centré sur le plastique. Document d'information du STAP. Fonds pour l'environnement mondial, Washington, DC ».
[9] N. J. Beaumont *et al.*, « Global ecological, social and economic impacts of marine plastic », *Mar Pollut Bull*, vol. 142, pp. 189–195, mai 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.03.022.
[10] 2019 Alessi E., « Mettons fin à la pollution plastique. Italie : un guide pratique pour sortir de la crise du plastique », Rome, 2019.
[11] M. Beatrice C. Mauro Aglietto, *Réutilisation des matériaux polymères*. 2015.
[12] Plastics Europe 2021, « Une analyse des données européennes sur la production, la demande et les déchets de plastiques ».
[13] Asso Ambiente, « Rapport Italia che ricicla 2023 ».
[14] A. Veksha *et al.*, « Technical and environmental assessment of laboratory scale approach for sustainable management of marine plastic litter », *J Hazard Mater*, vol. 421, p. 126717, janv. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126717.
[15] « https://www.preciousplastic.com/ ».
[16] G. Erni-Cassola, V. Zadjelovic, M. I. Gibson et J. A. Christie-Oleza, « Distribution of plastic polymer types in the marine environment; une méta-analyse », *J Hazard Mater*, vol. 369, pp. 691–698, mai 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.067.
[17] COREPLA, « Rapport de développement durable 2022 ».
[18] L. C. S. D. V. P. G. V. M. E. S. Serena Carpentieri, « Déchets sur les plages, enquête sur les déchets sur les plages italiennes », 2019.
[19] O. Gerigny *et al.*, « Déchets sur les fonds marins du plateau continental et des canyons dans les eaux méditerranéennes françaises : distribution, typologies et tendances », *Mar Pollut Bull*, vol. 146, pp. 653–666, sept. 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.030.
[20] M. Galli *et al.*, « Variables océanographiques et anthropiques déterminant la répartition des déchets marins dans les zones protégées de la Méditerranée : données de terrain exhaustives étayées par une modélisation prévisionnelle », *Science of The Total Environment*, vol. 903, p. 166266, déc. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166266.
[21] Projet RIPARU, « Rapport d'activité intermédiaire RIPARU 2024 », 2024.
[22] Hansjurgen Saechtling, *Manuel des matières plastiques*, Ed. Tecniche Nuove. 2006.
[23] S. Serranti et G. Bonifazi, « Techniques de tri des déchets plastiques », dans *Utilisation de plastiques recyclés dans le béton éco-efficace*, Elsevier, 2019, pp. 9–37. doi: 10.1016/B978-0-08-102676-2.00002-5.
[24] V. Beghetto, R. Sole, C. Buranello, M. Al-Abkal et M. Facchin, « Recent Advancements in Plastic Packaging Recycling: A Mini-Review », *Materials*, vol. 14, n° 17, p. 4782, août 2021, doi:

10.3390/ma14174782.
[25] « https://www.lindner.com ».
[26] « https://www.untha.com/en ».
[27] « https://weima.com ».
[28] J. H. Wong, M. J. H. Gan, B. L. Chua, M. Gakim et N. J. Siambun, « Shredder machine for plastic recycling: A review paper », *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1217, n° 1, p. 012007, janv. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1217/1/012007.
[29] « https://www.rapidgranulator.com/ ».
[30] « https://www.simatecplastics.com/ ».
[31] « https://www.forrec.it/ ».
[32] « https://www.triaplastics.com/ ».
[33] « https://www.cmg-granulators.com/ ».
[34] « https://www.tecnofer.biz/it/ ».
[35] « https://www.brunofolcieri.it/ ».
[36] « https://trimecsrl.it/ ».
[37] « https://recytechnologies.it ».
[38] « https://sikoplast-recycling.com ».
[39] « https://www.costarelli.com ».
[40] « https://vecoplan.com/ ».
[41] « https://www.filtecsrl.eu/ ».
[42] Mujumdar A. S., *Handbook of Industrial Drying*, éd. CRC Press. 2007.
[43] Cangialosi F., *Propriétés et transformation des matières plastiques*. 2005.
[44] Moretto S.p.A., « Déshumidification Method and Installation, en particulier pour Granular (Déshumidificateur X Dryer 21) », EP 1 818 637
[45] « https://www.tecnovarecycling.com/ ».
[46] « https://www.mariscorp.com/ ».
[47] « https://breakmachinery.com/ ».
[48] « https://www.prtinnovation.com/ ».
[49] « https://www.italrec.com/ ».
[50] « https://www.eurexma.com/it ».