

Guide technique sur le recyclage des déchets plastiques dans les pays en développement



Pierre-François Bareel
Ir. de projet ISF

Ingénieurs Assistance Internationale – Ingénieurs sans Frontières
<http://www.isf-iai.be>
mail@isf-iai.be
avenue du Marly, 48, 1120 BRUXELLES - BELGIQUE



Pierre-François Bareel

Ir. de projet ISF

Guide technique sur le recyclage des déchets plastiques dans les pays en développement

Collection « Manuels Techniques »

Manuel réalisé par ISF avec le soutien de la Direction Générale
de la Coopération au Développement (DGCD)

© Ingénieurs Assistance Internationale - Ingénieurs sans Frontières 2002
<http://www.isf-iai.be>
mail@isf-iai.be
Avenue du Marly, 48, 1120 BRUXELLES - BELGIQUE

Je tiens à remercier Eric PIRARD, Jérôme BINDELLE, Vincianne GILLARD et Lison HELLEBAUT d'Ingénieurs sans Frontières pour la confiance dont ils ont fait preuve en me proposant la rédaction de cet ouvrage.

Ce guide n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et la participation de nombreuses personnes, en particulier :

Roger TCHUENTE (CIPRE, Cameroun) et Sébastien WILLERVAL ; Gery de BROQUEVILLE (Asmae) et les chiffonniers du MOKATTAM (Egypte) ; Jean-Christophe MAISIN, Thierry DAINVILLE, Thérèse STILMAN, Bolivar CASTRO (Volens–SOS PG) et leur partenaire DIA-AC (Cuernavaca, Mexique) ; Claudel TSIMBA (Vie Montante, RD Congo) ; Jean-Claude LAMBERT et Fabienne WINDELS (Criff) ; George MICHEELS (FN Herstal) ; Roger LOOZEN (Codéart) ; André FRISAYE ; Verele de VREEDE (Waste Consultants) ; Edmundo ALFARO.

Je voudrais également témoigner toute ma gratitude à Yves BEGUIN (ISF) pour sa contribution à la rédaction des chapitres 2 et 5 et à Philippe GODS pour la qualité de ses illustrations.

Enfin, merci à Ariane pour ses conseils avisés, ses relectures et son soutien lors des longues soirées de rédaction.

Ce guide a été réalisé par ISF BELGIQUE avec le soutien de la Direction Générale de la Coopération au Développement (DGCD). La reproduction et la traduction de courts extraits sont autorisées sans autorisation préalable à condition d'en citer la source.

Les photographies illustrant ce guide ont été généreusement cédées par différentes organisations (annexe I). Aucune reproduction ne peut être réalisée sans autorisation. Pour toute demande, s'adresser à ISF qui vous mettra en contact avec les personnes concernées.

Photo centrale de couverture :

Gisement de déchets plastiques du CIPRE à Yaoundé, Cameroun
(photo ISF)

Table des matières

Chapitre 1 : Objectif du guide

- | | |
|--|----------|
| 1. Pourquoi recycler les déchets plastiques ? | 5 |
| 2. A qui s'adresse ce guide ? | 6 |

Chapitre 2 : Les matières plastiques

- | | |
|---|-----------|
| 1. Qu'est ce que le plastique ? | 9 |
| Les polymères | 10 |
| Les matières plastiques | 16 |
| Les objets plastiques | 17 |
| Les déchets plastiques | 19 |
| 2. Comment identifier les plastiques ? | 21 |
| Critères généraux | 21 |
| Systèmes de marquage | 22 |
| Marques de mise en forme | 22 |
| Rayure à l'ongle (test de dureté) | 23 |
| Test de la flamme | 24 |
| Test de densité | 25 |
| Tests spécifiques pour confirmer | 28 |

Chapitre 3 : La collecte

- | | |
|---|-----------|
| 1. Sources de déchets | 29 |
| Les déchets industriels | 29 |
| Les déchets commerciaux | 30 |
| Les déchets agricoles | 31 |
| Les déchets municipaux | 31 |
| 2. Evaluation d'un gisement | 33 |
| Choix d'une zone de prospection | 33 |
| Caractéristiques générales de la zone étudiée | 34 |
| Inventaire des sources de déchets plastiques | 35 |
| Caractérisation des déchets récoltés | 40 |
| 3. Systèmes de collecte | 43 |
| La sensibilisation | 43 |
| Systèmes de collecte sélective | 45 |

Chapitre 4 : La préparation physique des plastiques

- | | |
|---|-----------|
| 1. Qu'est ce que la préparation physique | 55 |
| 2. Localisation du centre de recyclage | 57 |
| 3. Le tri | 58 |
| Pourquoi trier ? | 58 |
| Comment trier ? | 58 |
| Mise en œuvre du tri | 60 |

4. Le lavage et le séchage	63
Décontamination	63
Lavage	65
Séchage	69
5. La réduction de taille	72
Pré-découpage	72
Broyage	74

Chapitre 5 : La mise en forme des plastiques

1. Quelles sont les techniques accessibles ?	83
2. La granulation	84
L'extrudeuse	85
Le système de refroidissement	89
Le granulateur	90
3. L'extrusion	92
Extrusion de profilés	92
Extrusion-soufflage (corps creux)	93
Extrusion-calandrage (feuilles, plaques)	93
Extrusion-gonflage (films)	94
4. Le moulage par injection	96
Généralités	96
Presses d'injection à piston (injection-transfert)	97
Presses d'injection à vis	101

Chapitre 6 : Considérations économiques

1. Les coûts du recyclage	103
Achat des plastiques	103
Frais d'investissement	104
Coûts de traitement	104
2. Les débouchés	106
Inventaire des débouchés possibles	106
Ventes des plastiques recyclés	108

Chapitre 7 : Environnement et sécurité

1. Problèmes environnementaux	111
Problèmes d'hygiène liés aux déchets	111
Produits chimiques	111
Pollution de l'air	112
Nuisances sonores	113
2. Sécurité de travail	113
3. Qualité des produits issus du recyclage	114

Annexe 1 : Illustrations	115
---------------------------------	------------

Annexe 2 : Références bibliographiques	117
---	------------

Chapitre I

Objectif du guide

1. Pourquoi recycler les déchets plastiques ?

La gestion des déchets constitue un enjeu important pour tous les pays de la planète. Parmi les déchets ménagers ou urbains, on retrouve une part non négligeable de matières plastiques (2 à 12 % en poids selon le niveau de vie du pays). De plus, cette part est très volumineuse vu la faible densité de ces matières.

Si les plastiques ont de nombreuses qualités sur le plan technique, ils disposent d'un inconvénient de taille lié à leur élimination. Légers, ils s'envolent au premier coup de vent pour provoquer une pollution visuelle importante. On finit par les retrouver partout (le long des routes, dans les parcs, ...). Plus grave, lors des fortes pluies, ils s'engouffrent dans les égouts risquant de les boucher et d'empêcher l'écoulement de l'eau. Ceci peut engendrer des inondations plus ou moins graves¹. Enfin, certaines pratiques qui consistent à brûler ces déchets peuvent être lourdes de conséquences lorsque celles-ci sont réalisées sans maîtrise de la technique (température de combustion suffisante, traitement des fumées, ...) : pollution de l'air, inhalation de fumées toxiques, brûlures graves, ...



Figure 1.1 : Problèmes d'écoulement d'eau dus aux déchets plastiques dans un ruisseau de Kinshasa (RD Congo, 2003)

Pourtant le recyclage de ces déchets est possible et, lorsqu'il est correctement mené et que les conditions locales le permettent, il peut devenir une activité économiquement rentable, génératrice de revenus et créatrice d'emplois. Cette activité n'est pourtant pas aussi évidente qu'elle n'en a l'air. Cela est principalement dû à une certaine méconnaissance de ces produits, à leur grande diversité et aux différentes techniques possibles de traitements.

¹ Les graves inondations de juillet 1998 à São Paulo ont été attribuées aux nombreux films plastiques qui ont empêché l'évacuation des eaux pluviales vers le Rio Tietê.

2. A qui s'adresse ce guide ?

Dans son livre « Small-scale recycling of plastics » (1984), Jon VOGLER fut le premier auteur à capitaliser les informations recueillies sur le recyclage des plastiques dans les pays du sud. Son travail fut actualisé par Inge LARDINOIS et Arnold van de KLUNDERT (Plastic Waste, 1995). Basés sur des rapports d'expériences, ces deux ouvrages ont le mérite d'avoir mis au jour le mode fonctionnement des différentes filières possibles. Néanmoins, leur lecture ne permet pas la mise en œuvre directe des procédés décrits. Ils sont destinés aux organisations de coopération au développement ou aux décideurs locaux afin de les éclairer sur le potentiel que représente le recyclage des plastiques en matières d'emploi et de gestion des déchets.

Ce guide se veut plus technique. Il tente de décrire une à une les étapes essentielles permettant de réaliser un projet adapté à une situation locale. Il veille également à attirer l'attention sur les aspects importants à ne pas perdre de vue pour la viabilité du projet.

De manière générale, cet ouvrage sera utile à toute personne cherchant des réponses aux questions suivantes :

- Que sont les matières plastiques ? Comment les reconnaître ? Comment les recycle-t-on ?
- Quelles informations doit-on réunir avant d'entreprendre un projet de recyclage des plastiques ?
- Comment choisir une filière de recyclage appropriée ? Quels moyens faudra-t-il mettre en œuvre ? Où se procurer le matériel nécessaire ? Quels seront les investissements ?
- Comment mettre en place un système de collecte sélective ? Que récupérer ?
- Quels sont les principaux outils de transformation des plastiques ? Comment fonctionnent-ils ?
- Quels sont les débouchés pour les plastiques recyclés ?
- Quelles sont les questions qu'il faut se poser pour assurer la viabilité économique d'un projet ? Comment éviter de le faire échouer ?

Ce guide est à la disposition des personnes désireuses d'entreprendre une activité de recyclage dans un pays à bas et moyens revenus. L'expérience montre en effet que la rentabilité de ces initiatives dépend fortement des facteurs socio-économiques et géographiques qui sont favorables dans ces pays. Quelques pratiques sont déjà bien introduites dans certaines régions. Le lecteur initié se référera donc aux paragraphes qui l'intéressent.

Tous les détails et subtilités du recyclage des plastiques ne peuvent pas tenir en ces quelques pages. Ainsi, bien que toutes les filières classiques de recyclage soient présentées, deux seulement sont détaillées. Le choix s'est porté sur la régénération (fabrication de granulés) et le moulage par injection de petites pièces d'artisanat. Ces techniques sont probablement les mieux adaptées pour les projets d'activités à petite échelle permettant d'obtenir des produits à plus-values intéressantes. De plus, les aspects socio-économiques ne seront qu'abordés bien que leur prise en compte est capitale pour la pérennité d'un projet.

Ce guide n'apporte toutefois pas de solution pour l'éradication complète des sachets plastiques qui constituent la principale pollution visuelle. Le problème de ceux-ci est qu'ils sont très légers (peu de matière) alors que le recyclage nécessite au moins le même temps de travail que les autres déchets. Il est donc difficile de rendre leur recyclage économiquement rentable.

Des solutions, qui ne sont pas détaillées dans ce guide, existent toutefois. C'est le cas des techniques de fabrication de divers objets par crochetage de bandelettes de sachets plastiques triés, lavés et découpés. Ces techniques simples, nécessitant peu d'investissements, sont largement détaillées dans le manuel de Inge Van HOVE, publié par ENDA Tiers-Monde².

Ce manuel intéressera les groupements féminins à la recherche d'activités lucratives ainsi que les instituteurs qui veulent sensibiliser les enfants à la problématique des déchets plastiques. Il décrit des méthodes originales de récupération et valorisation des sachets plastiques permettant de

² Inge Van HOVE, Olivier GENARD, *Récupération et transformation artisanale des sachets de plastique usagés*, Atelier Art-utic, Enda Tiers-Monde, B.P. 3370 Dakar, Sénégal.

confectionner une large gamme de produits finis commercialisables tels que des balles, des bourses et des sacs de plage.

Chapitre 2

Les matières plastiques

1. Qu'est ce que le plastique ?

Bien que leur usage est devenu familier, les matières plastiques sont méconnues et souvent confondues. Elles sont apparues au milieu du 19^{ième} siècle, mais leur véritable développement a commencé dans les années 60. Aujourd'hui, leur production dépasse, en volume, celle des métaux. Elles font partie de la grande famille des matières synthétiques. Leurs domaines d'application sont très larges. Ils vont des objets les plus courants (bouteilles, sachets d'emballage, ...) à ceux relevant de la haute technologie (électronique, aérospatial, ...). Ceci est dû aux multiples propriétés que l'on peut obtenir à partir de ces matières.

De manière générale, les plastiques sont des produits fabriqués à base de pétrole. On estime que seul 4 % du pétrole servent à leur fabrication. La production mondiale de plastiques est de l'ordre de 150 millions de tonnes par an.

Pour recycler les déchets plastiques, il est important de bien les connaître. Pour cela, il faut partir des constituants de base des plastiques : les polymères. Mélangés avec différentes substances - les additifs – ces polymères forment les matières plastiques qui peuvent être mises en forme pour obtenir des objets plastiques commercialisables. Après utilisation, ces objets constituent un gisement de déchets plastiques qui peuvent être recyclés.

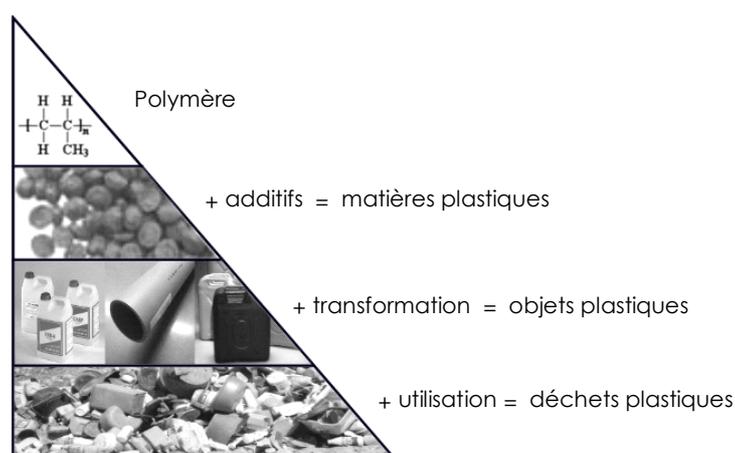


Figure 2.1 : Notion de polymères, matières, objets et déchets plastiques

Les polymères

Il est difficile d'expliquer la notion de polymères sans entrer dans des considérations théoriques.

Au point de vue chimique, les polymères sont composés de « macromolécules », c'est-à-dire de molécules de très grandes tailles formant des chaînes. Ces chaînes sont constituées d'un assemblage de maillons souvent identiques appelées « unités constitutives ». Les unités constitutives sont principalement composées d'atomes de carbone et d'hydrogène, mais on peut également trouver des atomes d'azote, d'oxygène, de chlore, de soufre, ...

Exemple

Le polypropylène (PP) est un polymère d'usage courant. On l'utilise notamment pour confectionner les bouteilles de lait et pour fabriquer du mobilier (chaises, tables, ...). Les macromolécules qui forment le PP sont du type suivant :

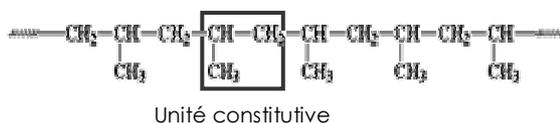


Figure 2.2 : Macromolécule du PP

On constate qu'il existe une séquence qui se répète tout le long de la chaîne. C'est l'« unité constitutive ».

Les polymères sont parfois simplement représentés par leur unité constitutive mise entre crochet.

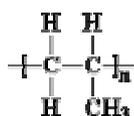
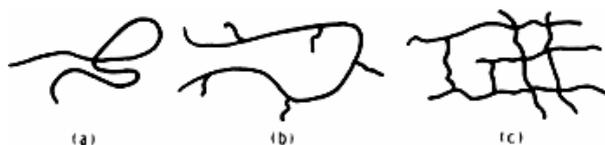


Figure 2.3 : Unité constitutive du PP

Le n signifie que la chaîne est constituée d'un nombre n unités constitutives. Ce nombre est variable. Il peut être très élevé (jusqu'à plusieurs centaines de milliers).

Cet exemple illustre le cas d'un polymère très simple. Tous ne le sont pas. En fait, une même chaîne peut être composée de différentes sortes d'unités constitutives et leur nombre dans chaque chaîne peut être variable. De plus, les chaînes peuvent se ramifier, voire se lier entre elles pour former des réseaux.



- a. Polymère à chaîne linéaire
- b. Polymère à chaîne ramifiée
- c. Polymère réticulé (en réseau)

Figure 2.4 : Agencement possible des chaînes

Ainsi, selon les types d'unités constitutives, leur nombre et la manière dont elles s'agencent, on obtient les différentes sortes de polymères. Théoriquement, le nombre de possibilités est presque illimité.

Dans les faits, on constate que seuls quelques polymères relativement simples sont produits en grande quantité. On les appelle les polymères de grande diffusion. Les autres, les « polymères techniques », servent pour des applications plus spécifiques et souvent de hautes technologies. Ils sont généralement plus chers !

De manière générale, les polymères sont immiscibles, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les mélanger entre eux pour obtenir une matière homogène. Cette constatation a une lourde conséquence :

« il est nécessaire de trier les plastiques avant de les recycler ».

Il faudra donc identifier le polymère à base duquel tout déchet plastique est fabriqué. Cette identification ne peut se faire sans une certaine connaissance des principaux polymères. Ceux-ci se répartissent en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

a. Les thermoplastiques,

« fondent lorsqu'on les chauffe »

Les polymères thermoplastiques ramollissent avec l'élévation de la température. Ceci est dû à leur structure linéaire ou ramifiée. Lorsqu'on les chauffe, les chaînes s'écartent et glissent les unes sur les autres : ils deviennent malléables. Ces polymères thermoplastiques peuvent donc être refondus et moulés sans que leurs propriétés ne soient (trop) modifiées.

b. Les thermodurcissables,

« restent durs lorsqu'on les chauffe »

Une fois moulés, les polymères thermodurcissables prennent une forme définitive. Leur structure est réticulée. Les chaînes sont donc liées entre elles et ne peuvent bouger. Les polymères thermodurcissables ne peuvent pas être refondus. On ne peut pas les recycler mécaniquement.

Remarques :

- Qu'ils soient thermoplastiques ou thermodurcissables, les polymères sont des matières combustibles : ils brûlent bien. Soumis à des températures trop élevées, les chaînes finissent par se briser et le polymère se dégrade irréversiblement.
- Contrairement à certaines idées préconçues, les caoutchoucs ne sont pas des matières plastiques mais des matières élastiques : « ils reprennent leur forme initiale après avoir été étirés » ! On les appelle aussi des élastomères. Ils servent principalement à la fabrication des pneus, semelles de chaussures, élastiques, chambre à air, courroies, ...

Les thermoplastiques sont de loin les polymères les plus employés. Il en existe plusieurs centaines de sortes mais, fort heureusement, seule une quinzaine d'entre elles est utilisée pour des applications communes.

Quatre thermoplastiques se partagent plus de 70 % du marché mondial des polymères : le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène et le chlorure de

polyvinyle (communément appelé PVC). Leur facilité de transformtaion et les grandes quantités produites font qu'ils sont de bons candidats au recyclage.

Ce guide se limitera donc au recyclage de ces quatre polymères qui vont être développés en détail. Par simplification, **les polymères thermoplastiques seront simplement nommés « plastiques »** dans la suite de l'ouvrage.

Le polyéthylène : PE

Le polyéthylène (PE) est le polymère le plus répandu. C'est aussi celui qui a la structure la plus simple. Ses chaînes sont uniquement composées d'atomes de carbone, chacun lié à deux atomes d'hydrogène.

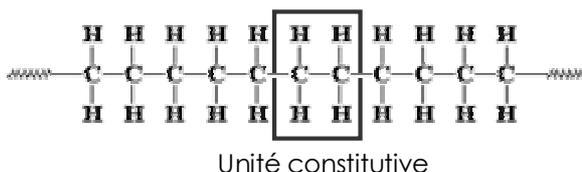


Figure 2.5 : Structure du PE

On peut le représenter plus simplement par son unité constitutive mise entre crochet.

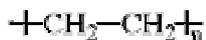


Figure 2.6 : Unité constitutive du PE

Selon la structure de leurs chaînes, on sépare les polyéthylènes en deux catégories : le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polyéthylène basse densité (PEBD). Contrairement aux autres polymères, le PEHD et le PEBD sont miscibles. Ils peuvent donc être recyclés ensemble. Néanmoins, afin de conserver leurs propriétés spécifiques, il est préférable de les séparer.

Le PEBD a une structure ramifiée. Il est souple et doux au toucher. S'il ne contient pas de pigments, il est transparent lorsqu'il est très fin (film) et blanc laiteux sous forte épaisseur. On l'utilise pour réaliser des films d'emballages et agricoles, des jouets, des tuyaux souples, sachets, tubes, flacons, bouchons vissés ou encliquetés, ...

Au contraire, le PEHD a une structure linéaire. Il est plus résistant, tant au point de vue mécanique (dureté, rigidité,...), que thermique. Il est opaque quelle que soit son épaisseur. On l'utilise dans la fabrication de films d'emballages industriels, flacons, bouteilles de lait, jerry cans, seaux, bouchons, jouets, réservoir de carburant, casiers réutilisables, ...

Le polypropylène : PP

De même que les polyéthylènes, le polypropylène (PP) est un polymère uniquement composé de carbone et d'hydrogène. Sa structure est formée de chaînes linéaires (cf. figure 2.2 et 2.3).

C'est un des polymères les plus polyvalents. Comme le PE, il est opaque s'il ne contient pas de pigments. Il est par contre plus rigide, il résiste mieux à la chaleur mais il est plus fragile à froid.

On l'utilise notamment dans la fabrication des pots de yaourts et de margarine, les différents réservoirs des fluides dans les automobiles (à l'exception des carburants), les pièces d'appareils électriques, les caissons de batteries de voitures, les meubles (chaises, tables, ...), les flacons, etc.

La résistance au choc du PP est fortement appréciée, entre autre pour la confection de pare-chocs de voiture. Une autre grande application est son utilisation comme fibres textiles.

Le chlorure de polyvinyle : PVC

Le chlorure de polyvinyle est mieux connu sous le nom de PVC. C'est un des polymères les plus anciens (1931). L'unité constitutive de ses chaînes est composée de carbone et d'hydrogène, mais également d'un atome de chlore.

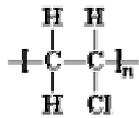


Figure 2.7 : Unité constitutive du PVC

Le PVC est un polymère dur et rigide. Il peut être transparent. On l'utilise principalement dans la fabrication de tuyaux (canalisations, gouttières, ...) et de profilés (châssis de fenêtres, ...).

Pour le rendre plus souple, on lui ajoute du 10 à 50 % de « plastifiants ». Ces molécules complexes s'intercalent entre les chaînes du polymère de manière à réduire sa rigidité. On l'appelle alors « PVC plastifié ». On peut l'utiliser pour réaliser des objets à gonfler, des chaussures, des bottes, des ballons, des tuyaux flexibles pour l'eau et le gaz, pour l'isolation des câbles électriques, ...

Le PVC et le « PVC plastifié » peuvent être recyclés ensemble. Les propriétés (rigidité) du produit résultant dépendront des proportions dans lesquelles ils sont introduits.

Remarques :

Bien que l'unité constitutive du PVC ne contienne qu'un seul atome de chlore, cet élément représente 57 % en poids du polymère. En brûlant, l'atome de chlore est libéré et inhibe la combustion. En d'autres termes, un objet en PVC en feu aura tendance à s'éteindre. Ce phénomène donne au PVC une très bonne tenue au feu. Par contre, il dégage de l'acide chlorhydrique (HCl) qui est toxique et corrosif.

Le polystyrène : PS

La structure du polystyrène (PS) peut paraître plus complexe que celles des précédents polymères. Comme pour le PP et le PVC, un atome d'hydrogène est substitué par un « cycle benzène », c'est-à-dire un anneau composé de carbone et d'hydrogène.

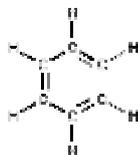


Figure 2.8 : Structure du benzène

Cet anneau est traditionnellement schématisé par un cercle inscrit dans un hexagone. L'unité constitutive du polystyrène se dessine alors de la manière suivante :

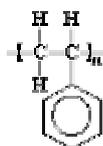


Figure 2.2 : Unité constitutive du PS

Le PS est apprécié dans l'emballage alimentaire pour son excellente stabilité chimique. Il en existe plusieurs sortes dont trois sont très répandues :

- le *polystyrène standard* (PS) :
Il est dur, rigide et transparent mais cassant et peu résistant au choc. On l'utilise dans les appareils électriques, les gobelets à usage unique, les cassettes audio et vidéo, les pinces à linges, ...
- le *polystyrène choc* (SB) :
En modifiant quelque peu sa structure, le PS est rendu plus souple pour mieux résister aux chocs. On l'utilise alors pour l'emballage de produits laitiers (yaourts, margarines, ...), les jouets, les boîtiers des petits appareils électroménagers, ...
- le *polystyrène expansé* (PSE) :
Lorsqu'on lui ajoute un agent moussant, le PS s'expande très bien. Il est possible d'obtenir un produit contenant 96 à 98 % d'air. Cette propriété du PS est largement exploitée dans l'emballage alimentaire, mais également pour l'isolation (frigo-lite).

Les autres

Les quatre polymères décrits ci-dessus représentent une grande partie des polymères produits (plus de 70 %). A ces polymères de grande diffusion, il faut ajouter le polyéthylène téréphtalate (PET). Ce polymère thermoplastique remplace de plus en plus le PVC pour la fabrication de bouteilles de boissons.

	Polymères	Abréviation	Objets
Thermoplastiques	Polyacrylonitrile Butadiène Styrene	ABS	Tableaux de bord, électroménagers, ...
	Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	Feux automobiles, plexiglas, ...
	Polytétrafluoroéthylène	PTFE	Pièces antifrictions (mieux connu sous le nom de téflon)
	Polyamides	PA	Fibres textiles
	Polycarbonate	PC	Compacts disques
Thermodurcissables	Polyuréthane	PUR	Mousses pour matelas, fauteuils, ...
	Epoxydes	EP	Colles, résines, vernis, ...
	Polyesters	UP	Plaques ondulées, ...
	Phénoplastes		Colles, vernis, mousses, ...
	Aminoplastes		Liants, vaisselles, ...

Tableau 2.1 : Autres polymères

Néanmoins, il ne faut pas oublier qu'il existe beaucoup d'autres polymères. A titre d'information, le tableau 2.1 en donne une liste non exhaustive ainsi que quelques-unes de leurs applications courantes.

Le recyclage de ces polymères n'est pas abordé dans cet ouvrage pour deux raisons :

- soit les faibles quantités disponibles ne justifient pas leur recyclage ;
- soit leur recyclage nécessite l'emploi d'outils trop onéreux et sophistiqués.

Pour en savoir plus sur les polymères :

<http://www.ac-nancy-metz.fr/enseignement/physique/CHIM/Jumber/Default.htm>

Cours général de chimie organique (pas uniquement sur les polymères)

<http://fr.search.encyclopedia.yahoo.com>

Recherche : « *matières plastiques* »

Résumé, en 6 pages, les principaux polymères.

<http://www.psrc.usm.edu/french/index.htm>

Cours spécifique sur les polymères (5 niveaux de difficultés)

http://perso.wanadoo.fr/olivier.albenge/page_site/Site_mat/polymys/pol_accueil.htm

Description des différents polymères (de la structure chimique à la mise en forme)

<http://chemphys.u-strasbg.fr/~mpb/teach/PEhd/>

Site entièrement dédié aux polyéthylènes

<http://www.dromadaire.com/mess20/pvc/>

Site pour tout savoir sur le PVC (généralités, sécurité, recyclage, ...)

www.spmp.org

Syndicat des producteurs des matières plastiques. Site vantant les mérites des plastiques mais sur lequel on peut trouver beaucoup de données.

Les matières plastiques

Les polymères sont fabriqués dans des grands réacteurs industriels. Ils pourraient être utilisés tels quels, mais on leur ajoute généralement différents additifs pour obtenir de meilleures propriétés. Le mélange « polymères + additifs » est appelé « compound », « prémix », ou plus simplement « matières plastiques ». L'importance n'est pas de connaître en détail ce que sont ces agents, mais de savoir qu'ils sont présents en différentes proportions dans les polymères.

- Les antioxydants et les stabilisants

Les antioxydants réduisent la dégradation des plastiques par l'oxygène et par les agents polluants présents dans l'air. On les retrouve principalement dans le PE et le PP.

Les stabilisants limitent la dégradation des plastiques par la chaleur et la lumière, notamment pour le PVC qui est très sensible à ces attaques.

- Les plastifiants

Les plastifiants sont des substances que l'on ajoute pour assouplir les polymères rigides. Ils sont principalement utilisés pour le PVC (cf. PVC plastifié, p. 15).

- Les agents moussants

Ces agents servent à transformer certains polymères en mousses. Il s'agit généralement d'hydrocarbure à bas point d'ébullition. Le cas le plus connu est celui du polystyrène expansé (frigo-lite).

- Les retardateurs de flammes (ignifugeants)

Les retardateurs de flammes sont ajoutés pour réduire l'inflammabilité des plastiques. Ils sont présents en grande quantité, notamment dans tous les plastiques utilisés pour des applications électriques (petits électroménagers, câbles, interrupteurs, ...).

- Les pigments et colorants

Les colorants et les pigments sont des substances que l'on ajoute en faible quantité (0,1 à 5 %) et qui donnent leur couleur aux plastiques.

Les colorants sont des liquides organiques qui donnent leur couleur en se dissolvant dans les polymères. Les plastiques obtenus peuvent conserver leur transparence ou leur translucidité.

Les pigments colorent les polymères en se dispersant entre les chaînes. Il s'agit souvent d'oxydes ou de sels métalliques : dioxyde de titane (blanc), oxyde de fer (rouge), sulfures de cadmium (jaune), noir de carbone (noir), ... Les plastiques obtenus sont toujours opaques.

- Les charges et renforts

Les charges sont des matières bon marché, incorporées dans les plastiques à raison de 5 à 60 % pour diminuer leurs prix de revient, mais également pour améliorer leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques. Ces modifications sont plus ou moins importantes selon la nature (minérale, végétale, synthétique, ...) et la forme (poudres, fibres, ...) des charges.

- Les lubrifiants

Ces additifs sont incorporés aux polymères afin d'assurer une lubrification interne et externe. La lubrification externe limite les frottements entre les polymères et les parois métalliques des équipements de mise en forme. La lubrification interne favorise l'écoulement des polymères et limite leur détérioration due au cisaillement dans les machines. Le PVC rigide nécessite notamment des lubrifiants internes sans lesquels il se détériorerait lors de la mise en œuvre. Les PE, PP et PS doivent également être lubrifiés. Beaucoup de lubrifiants remplissent les deux fonctions (lubrification interne et externe).

Les proportions des divers composants d'une matière plastique (polymères + additifs) constituent sa « formulation ». Lorsque l'on achète des matières plastiques, celles-ci se présentent généralement sous forme de granulés contenant déjà les différents additifs selon des formulations proposées par les producteurs. Seuls les pigments sont généralement ajoutés par les transformateurs.



Photo 2.1 : Granulés de PP

Les objets plastiques

Le passage des granulés de plastiques à l'état d'objets commercialisables se fait au moyen de machines de transformation. Les principales techniques de mise en forme sont décrites au *chapitre 5*.

A ce stade, il est important de faire deux remarques :

- un objet en plastique peut être composé de différentes sortes de plastiques ;
- un objet en plastique peut contenir d'autres matières que du plastique.

A titre d'exemple, prenons le cas simple d'un bidon d'huile. En apparence, il s'agit d'un bel objet en PEHD, intéressant à recycler. Lorsqu'on l'examine en détail, on constate qu'il est muni :

- d'un capuchon et d'une bague de fermeture ;
- une étiquette.

Le capuchon et la bague ont souvent une couleur différente de celle du bidon et peuvent être fabriqués à partir d'un autre polymère. L'étiquette en papier ou en plastique est collée au bidon.

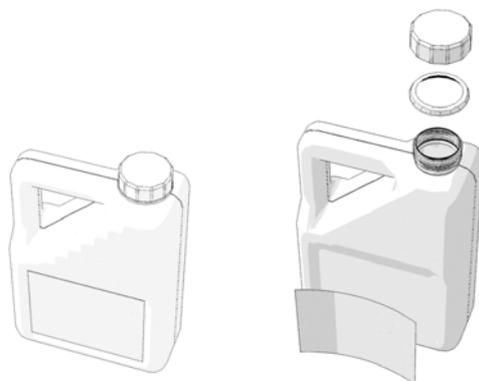


Figure 2.10 : Composition d'un bidon

Ces composants peuvent représenter 5 à 10 % en poids du bidon. Ils vont perturber le processus de recyclage. Il faudra donc les séparer. Le capuchon et la bague pourront être recyclés à part. L'étiquette et la colle devront être correctement retirées.

Cet exemple permet d'illustrer la notion de Degré de Contamination (DC). Il s'agit du rapport (exprimé en pourcents) entre le poids des matières autres que la matière plastique que l'on désire recycler et le poids total de l'objet, c'est-à-dire :

$$DC (\%) = \frac{\text{Poids}_{\text{des}_{\text{matières}_{\text{contaminantes}}}}}{\text{Poids}_{\text{total}_{\text{de}_{\text{l'objet}}}}} \times 100$$

Dans le cas du bidon d'huile, si l'on souhaite recycler uniquement le plastique du bidon, les matières contaminantes sont le capuchon, la bague, le papier et la colle. On obtient :

$$DC = \frac{\text{Poids}_{\text{(capuchon+ bague + papier + colle)}}}{\text{Poids}_{\text{total}_{\text{du}_{\text{bidon}}}}} \times 100$$

$$\approx 5-10 \%$$

Cela signifie que pour un lot de 100 kg de bidons, 5 à 10 kg ne seront pas recyclables.

Le degré de contamination est nul pour des objets fabriqués uniquement à partir d'un seul plastique (bacs de bières, chaises, bassins, ...). Il peut être parfois très élevé. Un exemple flagrant est celui des batteries de voiture. Le bac (fabriqué en PP) ne pèse pratiquement rien par rapport au reste (plomb, acide, armatures métalliques, ...). Le degré de contamination peut atteindre les 90 %.

Remarque :

Il importe d'introduire la notion d'« emballages multicouches ». Comme leur nom l'indique, ces emballages sont composés d'une série de couches de matières différentes : papier, carton, aluminium, plastiques, ... Ceux-ci sont intimement soudés entre eux. Il est rarement possible de les séparer afin de les recycler.

Un exemple bien connu est le carton de lait. Celui-ci est en fait composé de plusieurs couches de carton, d'aluminium et de PE.

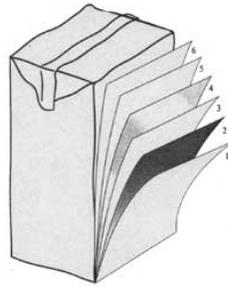


Figure 2.11: Emballage multicouche

Il n'est pas envisageable de séparer les différentes couches pour recycler les différents matériaux de manière isolée.

Les déchets plastiques

Après utilisation, les objets plastiques deviennent des déchets dont les utilisateurs veulent se débarrasser. Certains plastiques, tels que les emballages, deviennent rapidement des déchets ; d'autres mettent plusieurs années : mobiliers, pièces d'automobiles ou d'électroménagers, plastiques de construction, ...

Selon leur passé, ces déchets plastiques sont plus ou moins altérés et souillés.

L'altération est la modification de la structure chimique des polymères. Elle est due au vieillissement naturel des polymères mais également à l'oxydation, la chaleur, la lumière, ...

La souillure peut avoir deux origines :

- souillure propre aux déchets : il s'agit des résidus que contiennent encore les déchets. Elle concerne principalement les contenants et les emballages, par exemple des restes de shampoing dans un flacon, des résidus dans un pot de margarine, ...
- souillure d'apport externe : il s'agit de toutes les crasses accumulées par les déchets avant d'avoir été récupérés. Cette souillure peut être importante si le déchet a été mélangé à d'autres ou s'il a traîné sur le sol.

On appelle le Degré de Souillure (DS), le pourcentage de saletés que contient le déchet, qu'elles soient propres au déchet ou d'apport extérieur. On le détermine par pesées du déchet avant et après lavage,

$$DS (\%) = \left(1 - \frac{\text{Poids}_{\text{après lavage}}}{\text{Poids}_{\text{avant lavage}}} \right) \times 100$$

Le degré de souillure d'un déchet est un paramètre important lors de l'évaluation d'un projet de recyclage.

Plus il est élevé :

- plus le lavage du déchet est long et difficile ;

- moins la quantité de plastiques restante est importante.

Ainsi, les déchets provenant des décharges publiques ont un degré de souillure pouvant atteindre 25 %. Cela signifie que pour 100 kg de plastiques récupérés, il y a 25 kg de saletés. Seuls 75 kg pourront être triés.



Photo 2.2 : Déchets plastiques d'une décharge d'Arequipa (Pérou)

Les déchets plastiques sont par contre beaucoup moins sales lorsqu'ils sont collectés à domicile. Le degré de souillure est alors inférieur à 10 %.



Photo 2.3 : Gisement de déchets collecté à domicile à Yaoundé (Cameroun)

2. Comment identifier les plastiques ?

L'identification des plastiques est une étape capitale dans le processus de recyclage. En effet, comme expliqué précédemment, les plastiques se mélangent mal lorsqu'on les fond pour les remettre en forme. Une étape de tri est donc toujours nécessaire.

Tout le monde sait faire la différence entre un fil de cuivre et un câble en acier. Par contre, la reconnaissance des différentes sortes de plastiques est moins évidente tellement ceux-ci peuvent se ressembler. De plus, au sein d'une même famille, ils peuvent prendre des aspects très différents. L'identification requiert une certaine pratique mais elle devient vite un jeu d'enfant. On estime qu'il faut deux semaines pour qu'une personne se familiarise à la reconnaissance et au tri des principaux plastiques.

Dans le doute, seuls des tests permettent de trancher pour l'une ou l'autre catégorie de plastiques. Ceux-ci sont décrits dans les paragraphes qui suivent par ordre de difficultés de mise en œuvre.

Lorsqu'un plastique n'a pas pu être identifié avec certitude, il ne faut pas oublier qu'il peut faire partie d'une autre famille que les PE, PP, PS et PVC.

Critères généraux

Quelques propriétés générales des plastiques sont reprises dans le tableau suivant. Elles peuvent servir de point de départ à la reconnaissance.

Type	Flexibilité	Transparence parfaite	Divers
PEHD	Flexible	non	Films bruyants
PEBD	Très flexible	non, sauf les films fins	Toucher de cire Films difficiles à déchirer
PP	Rigide, mais ne casse pas	non	-
PVC	Cassant sauf si plastifié	oui	Rarement utilisé transparent sauf pour les bouteilles
PS	Rigide, cassant	oui	-
PET	Très flexible	oui	-

Tableau 2.2 : Propriétés générales des plastiques

Il est difficile de comparer les plastiques selon leur flexibilité. Celle-ci varie en fonction de l'épaisseur. Le critère de transparence n'est évidemment valable que si les plastiques n'ont pas été colorés.

Une autre propriété intéressante des plastiques est leur « pouvoir de pénétration » que l'on peut évaluer à partir du test du poinçon.

Test du poinçon :

Ce test est réalisé au moyen d'un outil perforant (ex : perforatrice, poinçon à ceinture, pointe, ...). Lorsque l'on veut percer un fragment de PE, de PP ou de PVC plastifié, il est nécessaire d'exercer une pression continue : on sent le poinçon pénétrer dans la matière. Au contraire, le PS, PET et PVC rigide se perforent d'un coup sec avec un bruit de cassure.

Systèmes de marquage

Depuis plusieurs années, certains pays (USA, Canada, Japon, Australie, Europe,...) imposent que les plastiques mis sur le marché soient marqués selon le système de numérotage international suivant :



Français	PET	PEHD	PVC	PEBD	PP	PS	Autres
Anglais	PET	HDPE	V	LDPE	PP	PS	Others

Tableau 2.3 : Système de marquage international

Cela facilite grandement le tri. Ces sigles sont soit apposés en relief au dos des pièces moulées, soit imprimés sur les pièces extrudées ou sur les films :

Marques de mise en forme

Les objets plastiques gardent des marques de leur mise en forme. Ces « cicatrices » sont différentes selon la technique de transformation utilisée. Ces techniques, décrites au chapitre 5, sont plus ou moins applicables selon le type de plastique.

A partir des marques de mise en forme, on peut savoir quelle technique a été utilisée et donc se faire une idée du type de plastique. Le tableau suivant donne les méthodes de transformation les plus fréquentes et leur importance en fonction des principaux plastiques.

	PEHD	PVC	PEBD	PP	PET
Injection	*	*	*	**	*
Extrusion	**	***	*	**	*
Extrusion-Soufflage	**	*	Peu	*	non
Injection-Soufflage	**	*	Peu	*	***
Film	*	***	***	*	*

Tableau 2.4 : Transformation des plastiques

On constate que presque toutes les méthodes sont utilisées pour tous les types de plastiques. La classification des déchets plastiques sur base de leurs marques de mise en forme a donc des applications limitées. Elle est néanmoins une méthode très rapide dans certains cas spécifiques.

Exemple :

Un exemple important est la distinction entre les bouteilles de boissons en PVC et celles en PET. Les bouteilles en PVC sont réalisées par extrusion, puis soufflage dans un moule. La base de la bouteille possède une cicatrice rectiligne qui est due à la fermeture du moule. Les bouteilles en PET sont par contre réalisées par injection-soufflage. La base de la bouteille possède dans ce cas une marque d'injection circulaire.

On trouve de moins en moins de bouteilles en PVC. Celles-ci sont progressivement remplacées par les bouteilles en PET, qui sont plus imperméables au gaz et plus résistantes à la pression (boissons gazeuses).



Figure 2.12 : Cicatrice d'une bouteille en PVC (extrusion-soufflage)

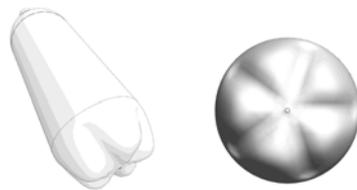


Figure 2.13 : Cicatrice d'une bouteille en PET (injection-soufflage)

Remarque :

Il est souvent intéressant de séparer les objets plastiques selon leurs méthodes de transformation. En effet, comme expliqué précédemment, les matières plastiques sont composées de polymères auxquels sont ajoutés des additifs, dont les lubrifiants et les plastifiants. Ces derniers sont introduits dans des proportions variables selon les applications. Sur le marché des matières plastiques, on trouvera par exemple du « PEHD pour injection » ou du « PEHD pour films ». Il s'agit bien du même polymère, mais les producteurs y ont ajouté des additifs facilitant respectivement l'injection ou le filmage. Bien qu'ils peuvent être recyclés ensemble, on préfère les séparer pour obtenir du plastique recyclé de mêmes propriétés.

Rayure à l'ongle (test de dureté)

Le test de dureté consiste à essayer de rayer le plastique avec son ongle. Ce test facile n'est pas toujours fiable. Il peut donner une première idée mais nécessite souvent une confirmation. Le tableau suivant donne les différentes aptitudes des plastiques à être rayés par l'ongle.

Type	Rayé à l'ongle
PEHD	Difficilement
PVC	Rigide = non Plastifié = oui
PEBD	Oui, facilement
PP	Non
PS	Non
PET	Non, ou très faiblement

Tableau 2.5 : Dureté des plastiques

Test de la flamme

Le test de la flamme est rapide et fiable. Il consiste à brûler un morceau de plastique et d'observer son comportement : inflammabilité, couleur de flamme, fumée, odeur, gouttelettes, ...

Description du test :

Couper une languette de plastiques de ± 5 cm de long et ± 1 cm de large. Le porter à la flamme d'un briquet, au dessus d'une surface inerte (un cendrier par exemple).

Interprétation :

En observant le comportement du plastique au contact de la flamme, il est possible de l'identifier à partir des critères suivants :

- facilité de combustion
- couleur de la flamme
- formation de gouttelettes (enflammées ou non)
- couleur de la fumée
- odeur dégagée par la combustion

Ces différents critères de classification sont repris dans le tableau suivant pour les principaux plastiques :

Type	Combustion	Flamme	Gouttelettes	Fumée	Odeur	Divers
PEHD	Facile	Base bleue sommets jaunes	Nombreuses enflammées	Blanche	Bougie	-
PEBD	Facile	Bleue et jaune	Nombreuses enflammées	Blanche	Bougie	-
PVC	La flamme s'éteint	Jaune aux bords inférieurs verts	Noires	Noire	Piquante (chlore)	Résidus charbonneux
PP	Facile	Flamme jaune à base bleue	Nombreuses enflammées	Blanche	Bougie mais moins forte	-
PS	Facile	Jaune orangé	Enflammées	Noire avec flocons	Gaz, sucrée	Bulles, fumerons noires
PET	Difficilement inflammable	Jaune	Oui, mais peu nombreuses	Légèrement noire	Faible odeur de beurre	-

Tableau 2.6 : Test de la flamme

Recommandations :

- Réaliser le test dans un lieu bien aéré, éviter d'inhaler les fumées ;
- Ne pas utiliser une bougie, sa fumée noire peut induire en erreur ;
- Réaliser l'essai au-dessus d'une surface adéquate (ex : cendrier, pierre, plaque de métal,...) pour éviter tout risque de brûlure ou d'incendie du aux gouttelettes brûlantes et/ou enflammées.

Il est important de se rappeler que certains plastiques contiennent des retardateurs de flammes. Ceux-ci peuvent modifier le comportement des plastiques avec la flamme.

Test de densité :

Le test de densité est basé sur le principe suivant :

« Un corps plongé dans un liquide flotte ou coule selon que sa densité est inférieure ou supérieure à celle du liquide »

Il est donc possible d'obtenir une information sur la densité d'un morceau de plastique lorsqu'on le plonge dans un liquide de densité connue :

- s'il plonge, sa densité est supérieure à celle du liquide ;
- s'il flotte à la surface, sa densité est inférieure à celle du liquide.

Les densités des principaux plastiques sont comprises entre 0,90 et 1,40 kg/dm³ :

Type	Densité (kg/dm ³)
PP	0,90
PEBD	0,91 – 0,93
PEHD	0,94 – 0,96
PS	1,04 – 1,10
PVC	1,30 – 1,35
PET	1,40

Tableau 2.7 : densité des principaux plastiques

En utilisant des liquides de différentes densités, il est possible de classer successivement les plastiques selon leur catégorie.

Bien que le principe soit simple, le test de densité est plus long à mettre en œuvre que les autres car il nécessite plusieurs manipulations. Il est par contre très fiable sauf si les plastiques sont fortement chargés. Les charges (et les autres additifs) modifient en effet la densité des matières plastiques.

Matériel :

- des récipients d'un litre minimum, transparents de préférence ;
- un outil tranchant pour prélever des copeaux de plastique : cutter, perforatrice, ...
- du sel de cuisine (NaCl) ;
- éthanol, méthanol : jusque 110 ml par litre. Acheter un produit pour lequel la densité exacte est indiquée sur le flacon ;
- un outil pour mélanger les solutions.

Description du test :

Prélever un petit morceau de plastique de la taille d'un confetti à l'aide d'un cutter, d'une perforatrice, d'un poinçon pour ceintures ou œillets, ... et le plonger ensuite dans un liquide de densité connue.

Différents liquides peuvent être utilisés pour le test de densité. Le plus simple est l'eau ($\gamma_{\text{eau}} = 1 \text{ kg/dm}^3$) avec laquelle on peut différencier les PP, PEBD et PEHB des PS, PET et PVC. Avec leur densité inférieure à 1, les PP, PEBD et PEHB flottent alors que les autres coulent.

Pour séparer le PS et le PVC, on peut utiliser une eau saturée en sel de cuisine (NaCl). Une telle solution est obtenue en ajoutant du sel dans de l'eau. La solution est saturée

lorsqu'il n'est plus possible de dissoudre de sel. On peut observer des cristaux de sel au fond du récipient. La densité du liquide est alors plus ou moins égale à 1,2 kg/dm³. Dans un tel liquide, le PS flotte tandis que le PVC et le PET coule.

Plus difficiles, les différences entre PP / PEHD ou PEBD / PEHB peuvent se faire avec des liquides de densités inférieures à 1 kg/dm³, obtenus en mélangeant de l'eau et de l'alcool.

Pour connaître la quantité x (ml) d'alcool de densité $\gamma_{alc.}$ qu'il faut ajouter à un litre d'eau de manière à obtenir un liquide d'une densité $\gamma_{sol.}$, on peut utiliser la formule suivante :

$$x \text{ (ml)} = \frac{1 - \gamma_{sol.}}{\gamma_{sol.} - \gamma_{alc.}} \times 1000$$

Les alcools les plus faciles à trouver dans les commerces sont le méthanol ($\gamma_{alc} = 0,79 \text{ kg/dm}^3$) et l'éthanol ($\gamma_{alc} = 0,81 \text{ kg/dm}^3$)¹.

Un liquide de densité égale à 0,93 kg/dm³ peut donc être obtenu en ajoutant 500 ml de méthanol ou 580 ml d'éthanol dans un litre d'eau. Dans un tel liquide, le PEHD coule alors que le PP et le PEBD flottent.

Pour obtenir des liquides ayant d'autres densités, on utilisera la formule ci-dessus, ou le tableau suivant. Il donne la quantité d'alcool à ajouter à un litre d'eau pour obtenir un liquide ayant la densité désirée.

Densité (kg/m ³)	Méthanol (ml)	Ethanol (ml)
0,90	920	1100
0,91	760	890
0,92	620	720
0,93	500	580
0,94	400	460
0,95	310	350
0,96	240	260
0,97	170	190
0,98	110	120
0,99	50	60

Tableau 2.8 : Densité des mélanges eau + alcools

Dans la pratique, il est difficile de séparer le PP du PEBD au moyen de ce test. Leurs densités sont trop voisines. Le test de la rayure à l'ongle permet par contre de les différencier.

Précautions :

- Les alcools sont des produits très inflammables et relativement toxiques ! Il faut veiller à réaliser les mélanges dans un endroit bien aéré et éviter toute inhalation de vapeurs. Il faut également placer ces produits hors de portée des enfants.

¹ Le propanol ($\gamma_{alc} = 0,78 \text{ kg/dm}^3$) peut également être utilisé si les autres sont difficiles à trouver.

- L'alcool s'évapore rapidement. Après avoir réalisé le test, il est nécessaire de fermer le récipient.
- Les impuretés (fines particules et liquides résiduels) peuvent modifier les densités des solutions. Il est nécessaire de les remplacer dès qu'elles commencent à se troubler.

La densité des liquides peut être contrôlée à l'aide d'un densimètre. Cet instrument est composé d'un flotteur en verre, lesté de plomb et surmonté d'une tige graduée.



Figure 2.14 : Densimètre

Le flotteur coule dans un liquide jusqu'à ce que le poids du liquide déplacé corresponde au poids du flotteur (Principe d'Archimède). Le densimètre flotte plus ou moins haut en fonction de la densité des liquides. Les graduations sont calibrées de manière à correspondre avec la surface du liquide.

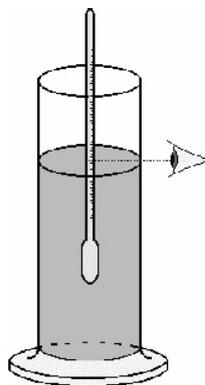


Figure 2.15 : Lecture de la densité

Les densimètres coûtent de 25 à 75 €/pce hors frais d'envoi. Une précision de 1-2 g/l est conseillée. Il faut veiller à ce que la gamme de densité couverte soit comprise entre 0,850 et 1,250 kg/l. Pour cela, il est souvent nécessaire d'en acheter deux.

On peut également les fabriquer soi-même, mais il est difficile d'obtenir les précisions requises pour la séparation des plastiques.

Site internet pour se procurer un densimètre :

www.labomoderne.com

www.vwrsp.com

www.bioblock.be

www.coleparmer.com

En anglais, densimètre = **hydrometer**

Tests spécifiques pour confirmer :

Outre les tests généraux décrits ci-dessus, il existe d'autres tests plus spécifiques pour différencier l'un ou l'autre plastique.

- PVC : faire fondre une petite quantité de plastiques en enfonçant un fil de cuivre dans un échantillon. Brûler ce fil à la flamme d'un briquet. Une flamme verte révèle la présence du chlore du PVC.
- PVC-PET : les plonger dans de l'eau chaude. Le PVC se ramollit, pas le PET.
- Les sachets sont généralement fait en PEHD et PEBD. Les sachets en PEHD sont plus bruyants et toujours opaques.
- Thermoplastiques-thermodurcissables : enfoncer un fil métallique chauffé à la flamme d'un briquet dans l'échantillon. S'il pénètre, c'est un thermoplastique, sinon, c'est un thermodurcissable.
- Caoutchouc : il suffit d'exercer une pression avec son ongle. Les caoutchoucs se déforment mais retrouvent rapidement leur forme de départ.

Remarque :

L'identification des plastiques devient vite une habitude, et les tests ne servent plus que d'outils de contrôle. Il est intéressant de se constituer une base de données des principaux types d'objets plastiques qui reviennent souvent. Ceci peut se faire en disposant un exemplaire de chaque en évidence sur une étagère. Chaque objet sera étiqueté.

Chapitre 3

La collecte

1. Sources de déchets Où collecter ?

Selon la dispersion géographique, le degré de souillure et l'hétérogénéité, il est possible de distinguer quatre sources de déchets plastiques : les déchets de l'industrie, les déchets commerciaux, les déchets agricoles et les déchets municipaux.

Les déchets industriels

« identifiés, non mélangés, peu souillés »

On appelle « déchets industriels », les déchets produits par des entreprises de transformation des plastiques, mais aussi, les rebus générés lors de l'utilisation de ces plastiques dans le secteur de l'emballage, de la construction, ... Tous ces déchets n'ont pas encore intégré le cycle de la consommation.

Les entreprises de transformation des matières plastiques génèrent des déchets internes qui peuvent être :

- des **purges**, qui se présentent généralement sous forme de gros blocs de plusieurs kilos. Il s'agit des résidus résultants de la vidange des appareils d'injection ou d'extrusion. Ceci peut avoir lieu pour diverses raisons : mises à l'arrêt, entretiens, changements de moules ou de filières, changements de couleurs des plastiques. Ces plastiques ne sont donc pas toujours de première qualité. Ils peuvent notamment contenir une part importante de lubrifiants.
- des **carottes et grappes d'injection** ; il s'agit de la matière qui remplit les canaux d'injection (cf. chapitre 5). On les récupère lors du démoulage des pièces injectées. Elles font, au maximum, quelques dizaines de grammes.
- des **pièces présentant des défauts** et qui ne peuvent donc pas être vendues.

Tous ces résidus peuvent représenter 10 % de la production.

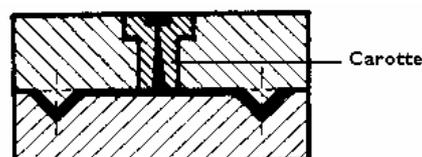


Figure 3.1 : Carotte d'injection d'un moule

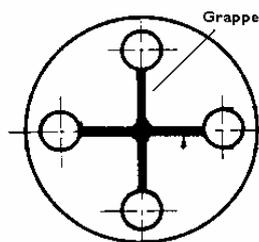


Figure 3.2 : Grappe d'un moule à quatre empreintes

Les grosses entreprises de transformation possèdent généralement leur propre filière de recyclage (recyclage primaire). Celles qui n'ont pas les moyens préfèrent sous-traiter cette activité en donnant ou revendant leur rebus à des ateliers capables de les recycler. Elles sont généralement intéressées de racheter ensuite les plastiques recyclés.

Remarque :

Les blocs de purges sont très difficiles à broyer. Ils nécessitent un découpage préalable que peu d'entreprises se donnent la peine de faire. Il peut donc être intéressant de les récupérer à bas prix et de les recycler.

Les entreprises de transformation ne sont pas les seules à produire des déchets industriels. D'autres entreprises utilisent des plastiques. Leur activité peut générer d'importantes quantités de rebus.

A titre d'exemple, on peut prendre les entreprises de fabrication de châssis de fenêtre. Celles-ci achètent des profilés de PVC extrudés à des transformateurs. Ils les coupent aux dimensions voulues pour réaliser les châssis. Ils génèrent ainsi des rebus propres et bien identifiés qui pourront facilement être collectés et recyclés. Le secteur de l'emballage et du conditionnement est également une bonne source de déchets.

Les déchets industriels sont une source de plastiques souvent oubliée. Elle offre pourtant de nombreux avantages :

- gisement déjà identifié ;
- approvisionnement régulier ;
- déchets propres et non mélangés ;
- collecte intégrable au sein de l'entreprise ;
- points de collecte géographiquement bien définis ;

Les déchets commerciaux

« identifiés, mélangés »

Les déchets commerciaux sont des déchets issus des ateliers et des commerces. Après un inventaire de ces différents établissements, il est possible d'identifier le type de déchets plastiques qu'ils génèrent. Un système de collecte sélective peut alors être introduit au sein même de ces établissements.

On peut distinguer deux types de déchets commerciaux :

Déchets Mélangés / peu souillés	Déchets Mélangés / souillés
grands magasins (emballages), entrepreneurs (tuyaux, films, ...), plombiers (tuyaux PVC),...	hôtels (contenants, ...), restaurants-bars (flacons, bouteilles, ...), stations services, garages (bidons), coiffeur (flacons), hôpitaux, pharmacies, ...
Avantages : <ul style="list-style-type: none"> - approvisionnement régulier - points de collecte établis - tri facile - lavage léger 	Avantages : <ul style="list-style-type: none"> - approvisionnement régulier - points de collecte établis - tri facile

Tableau 3.1 : Déchets commerciaux

Les déchets agricoles

Les activités agricoles et forestières sont également consommatrices de plastiques soit pour la construction (tuyaux d'irrigation, tuteurs, bâches, ...), soit pour le conditionnement (jerry cans, sacs à grains, films plastiques, ...). Ces gisements sont souvent plus éloignés, mais il ne faut pas les négliger. Moyennant une bonne sensibilisation, les agriculteurs peuvent stocker leurs déchets plastiques. On peut alors collecter ces déchets une à deux fois par an.



Photo 3.1 : Bâches en PVC pour le stockage d'eau

Les déchets municipaux

« non identifiés, mélangés, souillés »

Les déchets plastiques issues des ordures ménagères sont généralement le gisement le plus important. Ce gisement est directement lié au niveau de consommation de la population ciblée, ceci pour deux raisons :

- un habitant peut émettre jusqu'à 1 kg de déchets divers par jour si son pouvoir d'achat est élevé, mais cette valeur est inférieure à 0,5 kg par jour pour une personne aux moyens limités ;
- de même, selon le niveau de vie, les plastiques contenus dans ces déchets représentent 3 à 8 % (en poids).

Ainsi, la quantité de déchets plastiques émise par habitant et par an peut varier entre 5 kg et 25 kg. Ces déchets sont généralement hétérogènes, fortement souillés et très dispersés. Ils sont principalement constitués d'emballages : films, sachets, flacons, ... Leur flux est par contre régulier.

On peut récupérer les plastiques des déchets municipaux :

- directement chez l'habitant (les moins souillés)
- dans les rues et les parcs (très souillés)
- dans les centres de tri (très souillés)
- dans les décharges publiques (très souillés)



Photo 3.2 : Ramassage des déchets dans la rue (Yaoundé)

Les centres de tri sont généralement des micro- ou petites entreprises qui réalisent la collecte des déchets ménagers pour en faire du compostage. Ils effectuent souvent un tri sommaire de ces déchets afin d'en extraire les métaux et les plastiques. Si les métaux sont parfois valorisés, les plastiques sont souvent entassés. Ils peuvent représenter des gisements importants.



Photo 3.3 : Tri manuel des matières non-organiques dans un centre de compostage (Brésil)

Outre les apports réguliers, il est important de ne pas négliger les déchets générés par certains événements tels que les fêtes locales, braderies, manifestations diverses, ... durant lesquels des déchets plastiques relativement bien identifiés mais généralement souillés sont jetés.

2. Evaluation d'un gisement

L'objectif d'une campagne d'évaluation de gisement est de déterminer le potentiel de déchets plastiques dont on dispose pour réaliser un projet : localisation, quantité, qualité, renouvellement, ...

La campagne d'évaluation est une étape indispensable pour le choix et le dimensionnement d'une filière de recyclage. Elle permet de connaître la quantité de déchets pouvant être traités, les types de plastiques à recycler, le système de collecte à mettre en oeuvre, le choix des machines, les investissements nécessaires, la main d'œuvre requise, ...

Campagne d'évaluation du gisement	Choix d'une filière
<ul style="list-style-type: none"> - quantité de plastiques disponibles ; - principales sources de déchets ; - types de plastiques (PE, PP, PVC, ...) ; - renouvellement de la quantité de déchets émise ; - ... 	<ul style="list-style-type: none"> - types et quantité de plastiques à recycler ; - choix d'un système de collecte ; - espace nécessaire pour le lavage, séchage, la transformation, ... - capacité du broyeur et des autres machines, investissements ; - types de débouchés ; ...

Tableau 3.1 : intérêts de l'évaluation d'un gisement pour le choix d'une filière de recyclage.

Les paragraphes suivants décrivent l'approche générale à adopter pour une campagne détaillée relative à toutes les sources d'approvisionnement possibles. Lorsque les grandes lignes d'un projet sont déjà définies, il n'est pas nécessaire de prendre en compte toutes ces étapes. On laissera le choix au lecteur de se rapporter aux parties qui concerne son projet.

Choix d'une zone de prospection

Avant toute chose, il est important de choisir judicieusement la zone géographique dans laquelle les plastiques seront collectés. Il est certain qu'un projet n'est pas l'autre. Certaines contraintes peuvent directement délimiter la zone de collecte. De même, les objectifs à atteindre par le projet pourront être déterminants.

Ainsi, pour un projet de recyclage des plastiques dont l'objectif s'insère dans un plan de gestion de déchets d'un quartier ou d'un village, on veillera à ratisser large et à couvrir l'entièreté des déchets générés dans cette zone. Au contraire, si l'intention est de fabriquer des objets de qualité en plastiques recyclés, l'initiateur du projet se dirigera vers les zones à hauts revenus ou fortement industrialisées dans lesquelles la quantité et la qualité des déchets plastiques sont généralement plus élevées.

Quelques critères doivent toutefois orienter les choix d'une zone :

1. On veillera à choisir de préférence les zones les plus proches du centre de recyclage. En effet, **transporter des déchets plastiques coûte très cher**. Ceci est dû à leur faible masse volumique : 100 à 400 kg/m³. Les volumes à déplacer sont donc vite importants. Au niveau du transport, l'emplacement idéal du centre est évidemment le centre de la zone prospectée.

2. La quantité de déchets plastiques générée par un ménage est liée à sa consommation, donc à son pouvoir d'achat. On trouvera ainsi plus de déchets plastiques dans les poubelles des quartiers riches que des quartiers défavorisés.
3. Plus la zone est grande, plus le système de collecte à mettre en place est important. Dans un premier temps, il est préférable de se limiter à une petite zone, pour ensuite s'étendre.
4. Dans la mesure du possible, on essaiera de se rapprocher au maximum des zones industrielles. Celles-ci sont en effet génératrices de déchets, mais peuvent également être consommatrices de plastiques recyclés.

Caractéristiques générales de la zone étudiée

La zone de prospection étant définie, une enquête préalable est nécessaire pour bien préparer la campagne d'échantillonnage. Les informations recueillies constitueront en quelque sorte la carte d'identité de la zone étudiée.

Parmi ces informations, on trouvera :

- la superficie de la zone S_{zone} (km²), évaluée de préférence à l'aide d'une carte ;
- le nombre d'habitants dans la zone N_{zone} ;
- la densité de population ρ_{zone} , déduite des deux premières données par la formule :

$$\rho_{zone} = \frac{N_{zone}}{S_{zone}} \text{ (hab./km}^2\text{)}$$

- le climat de la région concernée. Celui-ci conditionne le séchage : le nombre de jours d'ensoleillement, la température moyenne, la pluviométrie, l'humidité, l'importance du vent, ... Toutes ces données permettront d'opter pour l'une ou l'autre technique de séchage.
- les principales activités économiques de la zone : commerce, agriculture, élevage, industries, ...
- une description de l'habitat : zones rurales ou urbaines ? Le type de logement : maison individuelle ? immeubles ? ferme ? ...
- les évènements et les activités saisonnières.

Les évènements sont des jours particuliers durant lesquels la quantité de déchets émis peut-être plus importante qu'à l'habitude : foires, braderies, manifestations locales, fêtes, ... Lors d'une campagne de caractérisation, on veillera à ne pas prendre en compte ces évènements. Il est cependant important de les recenser car ils peuvent constituer des apports de déchets supplémentaires.

Certaines régions bénéficient d'activités saisonnières. C'est notamment le cas des zones touristiques pour lesquelles l'afflux de touristes en périodes de vacances entraîne une augmentation de déchets qui peut-être non négligeable. Il est alors nécessaire de distinguer les périodes touristiques des autres périodes.

Remarque :

Lorsque des différences trop marquées apparaissent au sein de la zone étudiée, il est préférable de la diviser en zones plus petites (sous-zones). Chaque sous-zone est alors caractérisée de la même manière qu'une zone.

Ceci peut arriver dans les situations suivantes :

- deux quartiers dont les niveaux de vie sont fortement différents ;
- une zone industrielle accolée à une zone résidentielle ;
- un marché permanent inclus dans une zone résidentielle ; ...

Inventaire des sources de déchets plastiques

Une fois que la carte d'identité de la zone est établie, on peut s'interroger sur les possibilités d'approvisionnement en déchets plastiques. Ceci se fait en dressant l'inventaire des sources disponibles. Pour chacune d'elles, il faut prélever des échantillons représentatifs qui, après caractérisation, permettront d'évaluer le potentiel de plastiques recyclables de la zone.

a. les déchets industriels

Le recensement des entreprises de transformation des matières plastiques doit se faire bien au-delà des frontières de la zone ciblée. En effet, celles-ci pourront jouer un rôle déterminant dans le projet : sous-traitement de leurs déchets internes, vente de matériel d'occasion, rachat des matières plastiques recyclées, ...

Pour chacune d'elles, on recueillera les informations suivantes :

- les types de plastiques qu'elles transforment : PP, PVC, PEHD, PEBD, ...
- les techniques de transformation utilisées : injection, extrusion, soufflage, filmage, ...
- les articles fabriqués : bassins, chaises, films, sacs, semelles, ...
- la production (t/mois).

On leur posera également les questions suivantes :

- *Leur activité génère-t-elle des déchets ?*
- *Si oui, lesquels ? Purges, carottes ou grappes d'injection, pièces défectueuses, ...*
- *Recyclent-elles leurs déchets internes (recyclage primaire) ?*
- *Sont-elles intéressées pour sous-traiter cette activité (ou une partie de celle-ci) ?*
- *Si oui, laquelle ? Quelle quantité de plastiques cela représente-t-il ?*

On profitera également de cette prise de contact pour s'informer sur leur intérêt de travailler avec des matières recyclées provenant du centre de traitement créé par le projet (cf. chapitre 6).

Outre les entreprises de transformation, il est important de recenser toutes les entreprises ayant des activités susceptibles de générer des déchets plastiques et de rencontrer leur direction.

- *Quels types déchets produisent-elles ? En quelle quantité ? Qu'en font-elles ?*
- *Seraient-elles d'accord de les confier à un centre de recyclage ? Sous quelles conditions ? Seraient-elles d'accord de mettre en place un système de collecte sélective de ces déchets au sein de leur entreprise ?*

b. les déchets commerciaux

Lors d'une campagne d'évaluation, il n'est pas envisageable de faire le tour de tous les commerces présents dans la zone concernée.

On évaluera plutôt ce gisement de déchets en utilisant la méthodologie suivante :

1. Déterminer les commerces les plus susceptibles de générer des déchets plastiques, et les grouper par catégorie. Pour chaque catégorie, décrire les types de déchets susceptibles d'être produits.
2. Sélectionner quelques commerçants et entreprendre avec eux une campagne de collecte sélective de leurs déchets plastiques. Rien ne sert de travailler avec un trop grand nombre de commerces : trois à cinq suffisent généralement. Après avoir bien expliqué aux commerçants l'objectif de la campagne, on leur propose de mettre de côté tous les déchets en plastiques qu'ils obtiennent sur une certaine période de temps. Une quinzaine de jours est conseillée. Au terme de cette période, on récolte les déchets et on les conserve dans des sacs sur lesquels on note le nom du commerce et sa catégorie.
3. Peser tous les sacs et rapporter les poids par catégorie dans le tableau récapitulatif. Lorsqu'un échantillon d'une catégorie semble différent des autres, il vaut mieux l'écarter que de vouloir l'intégrer à tout prix aux autres. En effet, il risque de fausser les résultats, plus que d'apporter des informations intéressantes.



Photo 3.4 : Pesage des échantillons (Kinshasa, 2003)

4. Pour chaque catégorie, évaluer le nombre de commerces présents sur la zone de prospection.
5. Calculer la quantité de déchets disponibles par catégorie, puis les sommer pour obtenir le poids total de déchets commerciaux dans la zone étudiée.

Remarques :

- La sensibilisation des commerçants au projet est essentielle. La qualité des échantillons récoltés en dépend. Il est notamment important d'insister sur le fait que seuls les déchets du commerce doivent être conservés. Il ne faut pas y ajouter d'autres déchets. Certaines personnes ont en effet tendance à y insérer tous les déchets qu'elles trouvent afin de montrer qu'elles sont capables d'amasser des quantités importantes. Ces intentions, certes louables, risquent de fausser les données.
- Faire attention aux déchets des hôpitaux et des pharmacies. Ceux-ci ont pu contenir des médicaments ou autres substances à manipuler avec précaution. Le mieux est de bien se renseigner auprès des médecins et des pharmaciens, et

d'établir avec eux, une liste de déchets « recyclables ». Les autres déchets ne seront pas collectés.

- Si la zone n'est pas trop grande, un comptage systématique des commerces peut être réalisé en parcourant les rues. Lorsque la zone est trop vaste, ce travail devient trop conséquent. On préférera sélectionner quelques quartiers (sur carte, de préférence), effectuer le comptage des commerces dans ces quartiers et extrapoler à l'entièreté de la zone.

Exemple de tableau récapitulatif :

Catégorie	Type de déchets	Commerces sensibilisés			Dans la zone	
		Nbre	kg	kg/com.	Nbre	kg
Garages	Bidons d'huile	3	6	0,5	22	44
Stations-service	Bidons d'huile	4	24	6	4	24
Coiffeurs	Flacons (shampooing, laques, teintures, ...)	3	0,3	0,1	27	2,7
Cafés	Bouteilles, casiers, tables, chaises, ...	5	2,5	0,5	46	23
Pharmacies	Flacons	3	0,5	0,17	12	2
Hôpitaux	Flacons	2	0,8	0,2	7	2,8
Total					98,5	

Tableau 3.2 : Exemple de tableau récapitulatif d'une campagne d'évaluation (15 jours)

Exemple : Evaluation du nombre de commerces sur une zone de Kinshasa (2003)

La zone étudiée comprend trois communes populaires de Kinshasa : Lemba, Ngaba et Makala. Les niveaux de vie et les activités de ces trois communes étant fort différents, la zone a été divisée en trois sous-zones correspondant aux trois communes.

Vu l'importance des sous-zones, seuls quelques quartiers représentatifs des sous-zones ont été étudiés.



Figure 3.3 : Division de la zone en sous-zones et quartiers

Après avoir sensibilisés quelques commerçants, une campagne de collecte sélective a été entreprise sur une période de 15 jours. Elle a permis de déterminer la quantité de déchets plastiques produits par catégorie de commerces dans chaque sous-zone.

Les résultats sont extrapolés sur l'entièreté des sous-zone en appliquant un facteur égal au rapport de la surface couverte par la sous-zone et celle du (des) quartier(s) étudié(s) :

$$Q_{\text{sous-zone}} = Q_{\text{sensibilisés}} \times N_{\text{quartier(s)}} \times \frac{S_{\text{sous-zone}}}{S_{\text{quartier(s)}}}$$

avec,

- $Q_{\text{sous-zone}}$ (kg) : quantité de déchets plastiques produite dans la sous-zone ;
- $Q_{\text{sensibilisés}}$ (kg/com.) : quantité de déchets plastiques par commerces sensibilisés ;
- $N_{\text{quartier(s)}}$: nombre de commerce dans le(s) quartier(s) étudié(s) ;
- $S_{\text{sous-zone}}$ (m²) : superficie de la sous-zone (calculée à partir de la carte) ;
- $S_{\text{quartiers}}$ (m²) : superficie du (des) quartier(s) étudié(s) (calculée à partir de la carte).

Tous les résultats sont reportés dans un tableau :

Catégorie	Sensibilisés	Dans le quartier		Dans la sous-zone	
	kg/com.	N ^{bre}	Kg	N ^{bre}	Kg
Zone 1		Quartiers 1 et 2 (12 %)			
Garages	1,0	4	4,0	33	33,0
Station-services	4,0	-	-	6	24,0
Coiffeurs	0,1	4	0,4	33	3,3
Cafés	1,2	6	7,2	50	60,0
			Total zone 1		120,3
Zone 2		Quartier 1 (13 %)			
Garages	0,5	3	1,5	23	11,5
Cafés	1,0	7	7,0	54	54,0
Pharmacies	0,4	4	1,6	31	12,4
Hôpitaux	2,5	2	5,0	15	37,5
			Total zone 2		115,4
Zone 3		Quartier 1 (15 %)			
Coiffeurs	0,1	3	0,3	20	2,0
Cafés	0,7	6	4,2	40	28,4
Pharmacies	0,6	3	1,8	20	12,0
Hôpitaux	3,0	-	-	9	2,7
			Total zone 3		55,1
Total dans la zone					280,8

Tableau 3.3: Evaluation de la quantité de déchets commerciaux produits dans 3 communes de Kinshasa

On remarque qu'aucune station-service n'est installée dans les deux quartiers étudiés de Lemba (sous-zone 1). Il en existe pourtant six dans la commune dont deux ont été sensibilisées (4 kg/station). Les résultats ont pu être directement placés dans les dernières colonnes du tableau. Il en va de même pour les hôpitaux de la zone 3.

Au total, la quantité de déchets commerciaux produits dans les trois communes a été évaluée à 280,8 kg sur une période de 15 jours, soit 561,6 kg/mois.



Photo 3.5 : Campagne d'évaluation dans une station-service pratiquant le vindageage (Kinshasa, 2003)

c. les déchets agricoles

Lorsque ce type de sources de déchets se présente, on appliquera la même méthodologie d'évaluation que pour les déchets commerciaux. On choisira cependant une période de temps plus longue (2 à 3 mois) et un nombre d'exploitations plus important.

d. les déchets municipaux

Avant d'évaluer le gisement des déchets municipaux d'un quartier ciblé, il est nécessaire de bien savoir ce qu'il advient actuellement de ces déchets en se posant les questions suivantes :

- Existe-t-il un système de ramassage organisé? Si oui, de quel type (cf. Système de collecte sélective p.46)? Est-il structuré? Quelle est la fréquence de récolte? Quel type de transport?
- Où les déchets récoltés sont-ils déposés? Sont-ils triés dans un centre de récupération pour compostage ou autre? Sont-ils déversés dans une décharge municipale ou s'agit-il de dépôts clandestins?
- Y a-t-il beaucoup de déchets sur la voie publique?

Après avoir trouvé des réponses à toutes ces questions, il peut être utile de schématiser le transfert des flux des déchets sur papier afin de concevoir une stratégie pour l'estimation de la quantité de déchets plastiques disponible. Il n'existe pas une stratégie universelle, chaque situation est différente. Néanmoins, quelques lignes directrices peuvent être suivies :

1. Dans la mesure où leur activité est suffisamment structurée, il est toujours préférable de travailler avec les personnes déjà actives dans le ramassage des ordures. En effet, celles-ci réalisent une collecte chez l'habitant (collecte en amont) avec lesquels ils entretiennent généralement une relation de confiance. Après leur avoir expliqué le projet en détail, il est possible de mener une campagne d'évaluation avec quelques-uns de ces ramasseurs. Cette campagne s'étendra sur une quinzaine de jours et consistera à leur demander de séparer les déchets plastiques des ordures qu'ils collectent. Au terme de la campagne, ces plastiques seront pesés et les données seront introduites dans un tableau similaire à celui des déchets commerciaux. L'extrapolation à l'intégralité de la zone se fera après estimation des quartiers couverts par les ramasseurs.

2. Lorsqu'il n'existe pas de système de collecte suffisamment structuré, il est possible de réaliser une campagne de sensibilisation chez l'habitant. Pour cela, il suffit de sélectionner quelques quartiers de la zone et de procéder de la même manière que pour les déchets commerciaux, en motivant les habitants à séparer les plastiques des autres déchets.
3. L'évaluation directe dans la décharge est toujours déconseillée car les déchets qui y sont déversés sont souvent très souillés et que les conditions d'hygiène de travail y sont précaires. Néanmoins, lorsqu'il n'existe pas d'alternative, cette évaluation est relativement simple. Elle consiste à déterminer le pourcentage de plastiques contenus dans les ordures et d'évaluer la quantité de déchets quotidiennement acheminée à la décharge.

Le produit de ces deux résultats donne la quantité de plastiques disponible chaque jour :

$$Q_{décharge} = [Plast.] \times M_{décharge}$$

avec,

$Q_{décharge}$ (kg/jours) :	quantité de déchets plastiques quotidiennement disponible
$[Plast.]$ (%) :	pourcentage en masse de plastiques contenus dans les ordures
$M_{décharge}$ (kg/jours) :	quantité d'ordures quotidiennement acheminées à la décharge



Photo 3.6 : Estimation d'un gisement de déchets plastiques dans une décharge publique (Arequipa, 2003)

Des prélèvements d'échantillons seront effectués afin de caractériser les plastiques recensés.

4. L'évaluation des déchets qui traînent dans les rues est très difficile, voire impossible tellement leurs flux sont irréguliers et hétérogènes.

Caractérisation des échantillons récoltés

Une fois que les échantillons sont collectés et rassemblés, il reste à en déterminer leurs principales caractéristiques afin de connaître la proportion de matière valorisable dans ces déchets. Cette caractérisation est réalisée pour chaque catégorie de déchets collectés.

Pour se faire, différentes données peuvent être déterminées sur les lots collectés, à savoir :

1. Le degré de contamination : pour rappel, il s'agit de la proportion des matières autres que la matière plastique valorisable que contient le déchets : étiquettes, composants métalliques, plastiques de nature différente que celui de l'objet, Il est déterminé en retirant ces corps indésirables, en les pesants puis en calculant leur proportion en poids (cf. *chapitre 2*).
2. Le degré de souillure : il est déterminé en pesant les échantillons avant et après lavage (cf. *chapitre 2*).



Photo 3.7 : Détermination du degré de souillure de flacons récoltés dans les rues de Kinshasa (2003)

La connaissance des degrés de contamination et de souillure d'un lot de plastique permet de calculer la quantité de matière plastique potentiellement valorisable. Ainsi, pour des flacons en plastique pour lequel le degré de contamination est égal à 5 % et le degré de souillure est de 10 %, on saura que pour un kilo collecté, seul 855 g. pourront être potentiellement valorisés ($0,95 \times 0,90 \times 1000$ g.)

3. Les types de plastiques : ceux-ci sont déterminés selon les critères de reconnaissance décrit au *chapitre 2*. Ainsi, pour chaque lot collecté, on déterminera le pourcentage de chaque grande catégorie de plastique (PP, PEHD, PEBD, PS, PVC) ainsi que la proportion des autres plastiques pour lesquels une valorisation ne sera probablement pas envisagée.

Outre ces trois données importantes, d'autres caractéristiques pourront être déterminée. Ces le cas du pourcentage de matières ne passant pas dans un broyeur et nécessitant donc un découpage préalable. Dans le cas où l'on possède déjà un broyeur, il est obtenu en pesant les pièces qui ont une dimension supérieure à celle de l'ouverture du broyeur et en divisant le poids obtenus par le poids total de l'échantillon. Dans le cas contraire, on considèrera comme imbroyables, les déchets ne passant pas dans un trou rectangulaire (découpé dans une plaque de carton, par exemple) de 150 x 150 mm qui correspond à l'ouverture typique d'un broyeur d'une capacité de 150 kg/h.

$$\text{Plast.}_{\text{à découper}} [\%] = \frac{\text{Plast}_{\text{imb}} [\text{kg}]}{\text{Ech.} [\text{kg}]} \times 100$$

Les flacons et bouteilles seront généralement considérés comme appartenant à cette catégorie. En effet, leur forme arrondie fait en sorte qu'ils ne sont pas entraînés par les couteaux des broyeurs. Ils nécessitent donc un découpage préalable.

Une autre donnée intéressante est le temps de séchage (au soleil, par exemple) des matières plastiques lavées. Il permet d'évaluer l'aire de séchage à prévoir et, s'il s'avère que le séchage solaire n'est pas possible, d'étudier d'autres techniques de séchage (cf. chapitre 4).

Toutes ces caractéristiques ne doivent pas nécessairement être déterminées pour l'entièreté des lots collectés. Des échantillons plus petits, mais le plus représentatifs que possible, peuvent faire l'affaire. Au final, tous les résultats seront placés dans un tableau général qui permettra de mettre en évidence les gisements de plastiques intéressants, de dimensionner la filière de recyclage à mettre en œuvre (machines, ressources humaines, consommables, ...) et de budgétiser le projet (cf. chapitre 6).

Cette approche paraît longue et fastidieuse. Elle est pourtant nécessaire si l'on veut adopter une stratégie de travail pour mettre en œuvre son projet de recyclage, notamment en ce qui concerne les bilans des flux de matières et les perspectives économiques.

De plus, la caractérisation n'est pas seulement utile pour la phase d'évaluation, mais également en cour de production pour réévaluer l'exploitation de l'un ou l'autre gisement !

Pour en savoir plus sur l'évaluation de gisements de déchets :

Pour les personnes qui disposent d'un minimum de matériel et de connaissance en informatique, le logiciel MODECOM™ est un outil intéressant pour faciliter la gestion des données récoltées lors de la campagne, mais également en période de production. Ce programme, développé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, France) pour la gestion des ordures ménagères, peut être adapté à des projets tels que décrits dans ce manuel. Il permet de gérer la base de données et d'en retirer les informations essentielles.

Pour plus d'informations, on consultera le site de l'ADEME (www.ademe.fr) à la rubrique « publications ».

On y trouve les conditions de vente (prix : 30,49 €) et un bon de commande téléchargeable à renvoyer à l'adresse suivante :

Ademe
2, square La Fayette
BP 406 - 49004 Angers cedex 01
France

Téléphone : 00 33 (0)2 41 20 41 20

Télécopie : 00 33 (0)2 41 20 41 97

3. Systèmes de collecte

La sensibilisation

L'expérience montre que recycler les déchets plastiques est une activité qui peut être rentable. Cette rentabilité est souvent compromise lorsque le centre de recyclage doit prendre à sa propre charge la sensibilisation des personnes à la problématique des déchets. La sensibilisation nécessite en effet des moyens importants qu'il ne faut pas négliger. De manière générale, il est conseillé de séparer les deux activités et d'être imaginatif quant à la manière de réaliser la sensibilisation : recherche de financements parallèles à ceux du projet, implication des autorités locales ou d'associations sensibles à l'environnement, utilisation des moyens de communications (médias), ...

a. Sensibilisation des agents de collecte

La sensibilisation des agents de collecte est primordiale. Ils sont en effet directement en contact avec les producteurs de déchets et contribueront ainsi à leur sensibilisation. De plus, ce sont eux qui manipulent les déchets. Ils peuvent donc juger de la qualité du tri. Ces agents peuvent faire partie du centre de recyclage, travailler pour leur propre compte ou appartenir à un réseau de collecte existant. Leur sensibilisation peut se faire au travers de séances de formations. Ils y apprendront notamment :

- à prendre conscience du rôle qu'ils jouent dans la filière mise en place ;
- l'importance des dégâts qu'engendrent les déchets plastiques pour l'environnement, mais également le profit que l'on peut en tirer ;
- à différencier les plastiques recyclables des autres et évaluer leur qualité (souillure, contamination, ...) ;
- à sensibiliser à leur tour la population à la problématique des déchets plastiques.



Photo 3.8 : Formation des agents de collecte (Yaoundé)

Ne pas hésiter à leur expliquer en détail l'activité du centre, et les problèmes rencontrés tout au long du processus de recyclage, notamment lorsque la qualité des déchets est mise en cause. Il est également important d'engager des débats pour connaître les problèmes de chacun et trouver des solutions respectant tous les intérêts.

b. Sensibilisation des producteurs de déchets

L'éducation et la sensibilisation des habitants ou des producteurs de déchets à séparer les plastiques des autres déchets ne se fait pas du jour au lendemain. En effet, le public visé a souvent d'autres préoccupations que le tri quotidien de leur déchets. Il est pourtant important que ce tri soit effectué, l'approvisionnement en plastiques du centre de recyclage en dépend.

Les femmes et les enfants sont les plus sensibles aux problématiques environnementales. Les femmes sont les premières concernées car ce sont souvent elles qui gèrent les tâches quotidiennes des ménages, et donc la propreté et les déchets. Les enfants sont plutôt impliqués dans la collecte sélective à apports motivés (cf. tableau 3.5) qui leur apportera des petits revenus intéressants. De plus, la sensibilisation dès le plus jeune âge a des effets à long terme.



Photo 3.9 : Sensibilisation lors d'une réunion d'un comité de femmes (Yaoundé)

Les vecteurs de communication pour une bonne sensibilisation sont nombreux. Le tout est de ne pas manquer d'imagination.

A titre d'exemples, voici quelques idées :

- articles dans la presse locale, affiches dans les rues ;
- spots radios ou télévisés ;
- réunion au sein d'associations sensibles à l'environnement (notamment les associations de femmes) ;
- activités ludiques dans les écoles (concours de dessins, jeux sur le thème des déchets, ...);
- message lors de manifestations religieuses, sportives, culturelles, ...
- visite organisée du centre de recyclage en soulignant l'importance du tri à la source, c'est-à-dire chez les habitants.

Lors de ces campagnes, on veillera à démarginaliser les agents de collecte en insistant sur l'importance de leur activité pour la salubrité des quartiers.

La sensibilisation est une activité à renouveler perpétuellement. Les bonnes habitudes se perdent vite. Il est nécessaire de toujours trouver de nouvelles idées.

Systèmes de collecte sélective

Le système de collecte désigne « *la manière dont les déchets passent de l'habitant ou du producteur de déchets, au service de collecte* »¹. Dans le cas de la collecte des déchets plastiques, on parlera de collecte sélective, c'est à dire qui a pour but de ne rassembler que certains types de déchets. La collecte sélective peut s'insérer dans un système de collecte existant ou, au contraire, s'organiser en parallèle.

Avant de parcourir les différents systèmes de collectes sélectives qu'il est possible de mettre en œuvre, il importe de faire quelques recommandations :

- Il n'existe pas un système de collecte idéal. Chaque cas nécessite d'être étudié afin de répondre au contexte local et aux objectifs du projet. Les meilleurs systèmes de collecte sont ceux qui sont faits sur mesure et non ceux qui ont simplement été copiés.
- Se doter de moyens adaptés. En matière de collecte, il est en effet tentant de se doter de moyens dits « modernes » mais qui souvent ne répondent pas aux conditions des pays à faibles et moyens revenus. Ainsi, l'achat de véhicules coûteux, mais immobilisés parce qu'ils ne sont pas appropriés aux conditions des routes ou pour des raisons de prix de maintenance trop élevés ne constituent pas un investissement intelligent. Au contraire, il est souvent préférable de recourir à des méthodes utilisant un capital humain plus important et des technologies de base mieux adaptées au contexte.
- Pour des raisons d'hygiène de travail, il vaut mieux privilégier au maximum la « collecte en amont », c'est-à-dire chez l'habitant plutôt que la récupération dans les rues et les décharges. Les déchets y sont en effet moins souillés, donc moins contaminés. De plus, le lavage et le tri en seront facilités.

a. collecte sélective insérée dans un réseau existant

Le *tableau 3.4* reprend les systèmes de collecte de déchets les plus rencontrés (H.C. Haan, 1999). Pour chaque système sont proposées quelques suggestions pour y insérer une collecte sélective des déchets plastiques.



¹ H. C. Haan, A. Coad, I. Lardinois ; 1999 ; *Gestion des déchets solides municipaux : Engagez les micro- et petites entreprises, directives pour les responsables municipaux* ; Intermediate Technology Publications ; Londres.

Photo 3.10 : Collecte sélective insérée dans un système de « porte à porte » (Kinshasa, 2003)

Système	Description	Collecte sélective	Avantages	Inconvénients
Partagé	Les habitants ou producteurs de déchets peuvent apporter leurs déchets quand ils le souhaitent.			
Dépôts à des endroits spécifiés	Les habitants et autres producteurs de déchets déposent leurs déchets à un endroit précis ou dans un enclos en maçonnerie d'où ils seront transportés.	Possibilité de délimiter une partie de l'enclos réservée aux déchets plastiques.	Peu de frais d'investissement.	Chargement difficile. Le tri est peu contrôlé. Les plastiques sont souvent mélangés aux autres déchets, donc souillés. Vols des déchets plastiques.
Container partagé	Les habitants et autres producteurs de déchets mettent leurs déchets dans un container fréquemment enlevé ou vidé.	Un container peut être destiné aux seuls déchets plastiques.	Possibilités de concevoir des containers fermés qui limitent les vols.	Le tri est peu contrôlé. Les plastiques sont souvent mélangés aux autres déchets. Assez coûteux.
Individuel	Les habitants et producteurs conservent leurs déchets à domicile jusqu'à la collecte			
Collecte par bloc	L'éboueur attend à des endroits indiqués les habitants qui apportent les déchets aux véhicules de collecte.	L'éboueur peut récupérer les plastiques séparément et encourager les habitants à trier leurs déchets. Le véhicule doit pour cela être équipé d'un compartiment réservé aux plastiques.	Peu coûteux. Bon contrôle du tri. Possibilité de sensibilisation et de rémunération.	Nécessite qu'un membre de la famille soit présent et se déplace.
Collecte au bord du trottoir	Les déchets sont déposés devant les maisons et versés dans un véhicule ou balayés et ramassés par un éboueur.	Les habitants peuvent déposer les déchets plastiques à part. Ceux-ci seront ramassés séparément.	Commode pour les habitants.	Stockage des déchets dans la rue, d'où souillures et mélanges.
Collecte en porte à porte	L'éboueur se rend chez les habitants et attend que ceux-ci leur apportent les déchets.	Les habitants peuvent remettre leurs déchets plastiques séparément. L'éboueur les déposera dans un bac de son véhicule réservé aux plastiques.	Possibilité de sensibilisation et de rémunération. Pas de déchets dans la rue.	Nécessite la présence d'un habitant. Peu adapté pour les grands immeubles.
Collecte dans la cour ou le jardin	L'éboueur entre dans la propriété pour enlever les déchets.	Les habitants peuvent déposer les déchets plastiques à part. Ceux-ci seront ramassés séparément.	Commode pour les habitants. Pas de déchets dans la rue.	Nécessite une certaine confiance entre l'éboueur et les habitants.

Tableau 3.4 : Possibilités d'insertion d'une collecte sélective au sein de systèmes de collecte existants

Les collectes « par bloc » et « en porte à porte » donnent les meilleurs résultats car elles mettent en contact les habitants et l'agent de collecte. Celui-ci pourra faire de la sensibilisation pour améliorer la qualité des déchets plastiques apportés.

Il n'est pas toujours possible de modifier les habitudes des gens et la sensibilisation à séparer les déchets plastiques des autres déchets peut s'avérer non-concluante. Quoiqu'il en soit, l'agent de collecte peut toujours réaliser lui-même le tri des déchets

qu'il ramasse quotidiennement, et ceci quelque soit le système de collecte existant. Les plastiques ainsi récupérés lui apporteront une rentrée financière supplémentaire.

Exemple de collecte sélective au Caire (Egypte)

Le cas des chiffonniers du Bas-Mokattam est un des exemples les plus célèbres en matière de collecte. Ce quartier du Caire vit essentiellement de la récupération et de la valorisation des déchets. Tous les jours, les chiffonniers partent dans les quartiers riches du centre ville pour récolter les ordures ménagères (collecte en porte à porte, dans la cour ou dans le jardin). Ils se répartissent les quartiers en achetant un droit de récolte et se chargent de ramener les déchets dans leur maison afin de les trier. Le tri est généralement un affaire familiale. Les déchets sont séparés par type de matières (matières organiques, bois, cartons, papiers, métaux, plastique,...) mais également en fonction de leur destination. Ainsi, les déchets plastiques sont répartis par couleur, par objets (bidons, pots, semelles, ...) et par sorte. En ce qui concerne ces différentes sortes de plastiques, on constate que toute une terminologie a été créée. Ainsi, on ne parlera pas de PP, PE, PVC, ... mais de plastiques durs, mous, tendres, ...

Toutes les fractions obtenues sont vendues à des ateliers de recyclage du quartier ou à des intermédiaires qui se chargent de les valoriser. Il n'est pas rare qu'une partie de ces déchets soit directement vendus à des usines plus officielles. Ainsi, des passages du secteur informel au secteur formel sont assez courants.

b. collecte sélective établie en parallèle

Certains quartiers ne disposent pas toujours de filières de ramassage des ordures ménagères ou, lorsqu'elles existent, celles-ci peuvent ne pas être suffisamment structurées que pour y introduire une collecte séparée des déchets plastiques. Dans ces conditions, il est nécessaire d'établir un système de collecte propre aux déchets plastiques. Les différentes possibilités sont décrites dans le tableau 3.5.

Systeme	Description	Avantages	Inconvénients
Collecte en porte à porte	Des agents de collecte se rendent régulièrement chez les habitants ou les producteurs de déchets afin de les débarrasser de leurs déchets plastiques. Ces agents peuvent soit être employés par le centre de recyclage, soit être rétribués au poids par celui-ci. Dans certains pays, les agents de collecte rétribuent les habitants pour les kilos de plastiques reçus.	Possibilité de sensibiliser les habitants et les producteurs de déchets. Les déchets plastiques collectés sont souvent de bonne qualité.	Travail lent nécessitant un grand nombre d'agents. Nécessite la présence des habitants lors du passage des agents.
Apports volontaires	Des containers (fermés) sont disposés à des endroits stratégiques de la zone ciblée par le projet : carrefours principaux, abords des marchés, ... Les habitants ou producteurs de déchets plastiques viennent déposer leurs plastiques usagés. Les containers sont régulièrement enlevés ou vidés.	Systeme bon marché.	Pas de contrôle sur la qualité. Beaucoup d'autres déchets se retrouvent en général dans ces containers (donc souillures). Sensibilisation difficile à mettre en œuvre.
Apports motivés par rétribution au poids	Des agents de collecte se rendent régulièrement à des endroits stratégiques appelés « points de collecte ». Ils rétribuent les habitants ou les producteurs de déchets au poids de plastiques apportés. Souvent, des jeunes effectuent eux-mêmes une collecte en porte à porte et ramènent les plastiques obtenus aux points de collecte.	Contrôle de la qualité des déchets apportés. Les déchets peuvent être rétribués selon leur type s'ils sont déjà pré-triés par sortes. Une bonne sensibilisation est alors nécessaire.	Ce système peut s'avérer coûteux si les agents ne sont pas assez bien formés à la reconnaissance et au prix des déchets plastiques.

Tableau 3.5 : Possibilités d'insertion d'une collecte sélective en parallèles des systèmes de collecte existants

Système	Description	Avantages	Inconvénients
Centre de tri	Ces centres trient généralement les déchets ménagers pour en faire du compostage. Un arrangement est trouvé avec les dirigeants du centre de tri pour qu'ils trient également les déchets plastiques. Des agents se rendent régulièrement au centre afin de prélever les plastiques et rétribuent éventuellement au poids.	Les déchets sont déjà rassemblés en un endroit. Les centres de tri sont souvent intéressés de se débarrasser de ces déchets non-valorisés.	Les déchets plastiques sont souvent très souillés et contaminés par d'autres déchets (métaux, papier, cartons, ...)
Tri sur décharge (photo 3.12)	Le tri s'effectue lorsque aucun système de collecte sélective n'a pu être mis en place. Le tri est alors effectué par des personnes qui gagnent leur vie en amenant les déchets plastiques au centre de recyclage (ou à des points de collecte). Ils sont rétribués au poids de plastiques.	Les déchets sont rassemblés en un endroit.	Conditions de travail précaires (insalubrité). Ce système est à éviter au maximum.

Tableau 3.5 (suite) : Possibilités d'insertion d'une collecte sélective en parallèles des systèmes de collecte existants



Photo 3.11 : Tri sur décharge (Arequipa, 2003)

Lorsqu'un système de collecte à apport volontaire est proposé, il est parfois nécessaire de concevoir des containers fermés afin d'éviter tout risque de vol des plastiques déposés. La figure ci-dessous illustre une solution proposée à Kinshasa. Il s'agit d'un fût de pétrole au-dessus duquel sont soudés perpendiculairement deux tubes en acier. Un système d'ouverture cadénassée permet aux agents de collecte de récupérer les déchets plastiques lors de leur tournée quotidienne.



Figure 3.4 : Poubelle sélective fermée fabriquée à partir d'un fût (Kinshasa)

Le coût de fabrication de ce type de poubelle est de 75 € (Kinshasa, 2003).

Exemple de collecte à apport motivé à Yaoundé (Cameroun)

A Yaoundé, et plus précisément dans le quartier d'Etoug-Ebe, l'ONG CIPRE (Centre International de Promotion de la REcupération) a mis en place un système de collecte sélective par apport motivé par une rétribution au poids. Tous les quinze jours, une dizaine d'agents desservent la cinquantaine de points de collecte répartis dans ce quartier d'environ 100.000 habitants. Leur rôle est de réceptionner les déchets plastiques, de les pré-trier, de les peser, de les conditionner et de rétribuer les personnes qui les apportent.



Photo 3.12: Agent de collecte calculant les rétributions à verser à des enfants (Yaoundé)

Ce système permet de récupérer une dizaine de tonnes de déchets plastiques par mois, soit une tonne par agent de collecte. De plus, il offre l'avantage d'une certaine flexibilité. En effet, en adaptant sa grille de rétribution, le CIPRE peut récupérer les plastiques qu'il souhaite. Ainsi, les flacons en PE sont rétribués 25 CFA/kg (0,04 €/kg) alors que le kilo de semelles en PVC peut atteindre les 100 CFA (0,16 €). Ce système n'est toutefois pas exploité au maximum de ses possibilités car une vocation du CIPRE est de diminuer l'impact des déchets plastiques sur l'environnement.

Exemple d'un système mixte à Bangalore² (Inde)

L'Inde est l'un des pays les plus actifs dans le recyclage des déchets plastiques. Dans la ville de Bangalore, un double système de collecte existe. D'une part, 3000-4000 agents effectuent une collecte en porte à porte et achètent les déchets plastiques chez les habitants. Ces acheteurs itinérants collectent en moyenne 10 kg de plastiques par jour, à raison de 25 jours par mois. Cette collecte à la source permet d'obtenir des déchets plastiques de qualité, peu souillés, qui ont une valeur marchande intéressante.

D'autre part, 25.000 personnes effectuent du tri sur les différentes décharges de la ville. Ils en extraient 15 % de matières récupérables dont 4 % de déchets plastiques. En moyenne, chaque trieur récupère 8 kg de plastiques par jour et travaille 20 jours par mois. Ces déchets plus souillés sont revendus à un prix moindre que ceux collectés à la source.

² **Esha Shah Rajaram** ; 1997 ; *Plastic recycling in Bangalore – India, case study report plastic recycling* ; Waste Publications ; Gouda, the Netherlands.

c. **Fréquence, transport et transfert**

Outre le type de système de collecte sélective mis en place, il est important de s'interroger sur les trois paramètres que sont la fréquence du ramassage, le transport et le transfert.

1. La fréquence de ramassage des déchets plastiques est évaluée lors de la mise en place du système de collecte mais doit être régulièrement remise en question.

Elle est conditionnée par différents facteurs tels que :

- les quantités de déchets accumulées chez les habitants où dans les points de regroupement. Un ramassage trop peu fréquent provoquera des accumulations de déchets importantes et donc des nuisances : odeurs, pollution visuelle, risque d'être mangé par le bétail, ... Ceci peut décourager le tri et tous les efforts de sensibilisation seront anéantis.
- la qualité des plastiques, qui est directement liée au temps de stockage des déchets triés chez l'habitant, dans les rues ou dans les décharges.
- les habitudes de la collectivité locale. Dans certaines communautés, les déchets sont collectés tous les jours. Un ramassage moins régulier des plastiques triés peut provoquer un blocage et s'avérer irréalisable.

La fréquence de ramassage est donc un excellent indicateur de la qualité du service de collecte. Il est nécessaire de tout mettre en œuvre pour qu'elle soit la plus élevée possible.

2. On ne le dira jamais assez : « **Transporter coûte cher !** ». Et transporter des plastiques est encore plus cher vu leurs faibles densités (comprises entre 0,9 et 1,4, mais la masse volumique en vrac dépasse rarement 400 kg/m³). Il est donc nécessaire d'être très attentif sur cet aspect du projet.

Pour ce faire, quelques conseils peuvent être suivis :

- Ecourter un maximum les trajets, notamment en plaçant l'installation de recyclage le plus au centre possible de la zone concernée mais également en organisant intelligemment les circuits de ramassage.
- Utiliser des moyens de transport bon marché et adaptés à l'environnement local.
- Conditionner au mieux les déchets afin de densifier les contenus des véhicules de ramassage. Pour cela, il est parfois judicieux de déjà réaliser une première découpe avant de les disposer dans le véhicule.



Photo 3.13 : Déversement d'immondices municipales à Arequipa

Le choix du véhicule est très important. On ne compte plus les projets ayant optés pour des moyens de transport inadaptés et dont les véhicules (souvent très sophistiqués) se retrouvent à l'arrêt faute de carburant, de pannes, de pièces détachées introuvables, ...

Il est donc indispensable de bien étudier la situation locale avant d'investir. Les volumes de déchets à transporter et les distances à parcourir sont connus grâce à l'évaluation du gisement effectuée sur la zone.

Le tableau suivant reprend, par ordre d'investissement croissant, les différents moyens de transport traditionnellement utilisés pour la collecte des déchets en milieux urbains.

Véhicule	Volume	Rayon d'action	Accessibilité	Remarques
Charrette à bras	0,25 à 1 m ³	~ 1 km	Partout	Bon marché, aucuns effets négatifs sur l'environnement
Triporteur à pédales	1,5 m ³	1 à 3 km	Piste carrossable	Plus rapide, aucuns impacts négatifs sur l'environnement, durée de vie parfois limitée.
Charrette à traction animale	1,5 m ³	~ 7 km	Piste carrossable d'une largeur supérieure à 2,5 m	Investissement plus important (achat, alimentation et soins de l'animal). Peu d'impacts sur l'environnement à l'exception des excréments.
Petits véhicules motorisés (motocyclettes tracteurs, triporteurs,...)	1,5 à 4 m ³	Jusqu'à une dizaine de km	Piste carrossable	Durée de vie limitée car souvent poussés au maximum de leur capacité. Frais de carburant.
Pick up	3 à 6 m ³	Très élevé	Route et piste carrossable	Investissement important (prix d'achat, assurance, frais de carburant, entretiens, ...).
Camion	Jusque 12 m ³	Très élevé	Route carrossable d'une largeur minimale	Investissement très lourd, pièces de rechanges coûteuses et parfois peu accessibles, délais de livraison importants pour ces pièces, ...

Tableau 3.6 : Types de véhicules de collecte



Photo 3.14 : collecte primaire de déchets plastiques réalisée à l'aide d'une charrette à bras (Kinshasa, 2003)

L'accessibilité est une donnée plus qualitative. Les rues de certains quartiers sont trop étroites, encombrées ou non carrossables pour que des gros véhicules de ramassages puissent passer.

On apprécie l'accessibilité en recensant les rues de la zone et en les classant selon leur facilité d'accès :

- par de gros véhicules : camions de ramassage
- par des véhicules légers : pick-up, fourgonnette, petits véhicules motorisés, ...
- par des véhicules non motorisés : triporteurs, chariot, charrettes à bras, ...
- uniquement à pied.

3. La notion de transfert apparaît lorsque le système de collecte mis en place implique différents moyens de transport. On parle alors de différents niveaux de collecte :

- la **collecte primaire**. Il s'agit de la collecte à l'endroit de production du déchet à savoir chez l'habitant, dans l'entreprise, chez le commerçant, ... Lorsque les distances à parcourir le permettent et les quantités de déchets amassées ne dépassent pas la capacité du véhicule utilisé, les déchets sont directement déposés au centre de recyclage.
- la **collecte secondaire**. Les distances du lieu de collecte à la décharge ou au centre de recyclage sont parfois trop longues, notamment pour des véhicules du type charrettes à bras ou triporteur. Il est alors préférable de procéder à un rassemblement des déchets et de les transférer ensuite dans un véhicule de plus grande taille et mieux adapté pour des longs trajets. On appelle ces lieux de rassemblement des sites de transfert.
- la **collecte tertiaire, quaternaire, ...** Ainsi de suite, on peut multiplier les moyens de transport et les sites de transfert. Les déchets peuvent également transiter par des centres de tri. Les matières recyclables sont alors acheminées vers les centres de recyclage tandis que les déchets ultimes partent à la décharges.

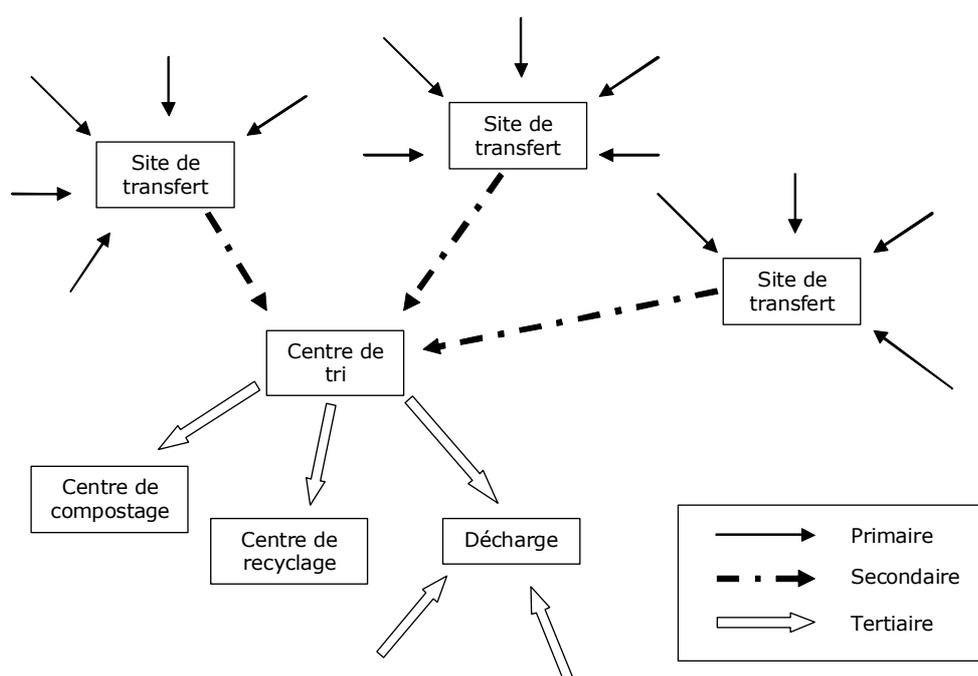


Figure 3.5 : Exemple de schéma de système de collecte primaire, secondaire, ...

La question est de savoir s'il faut procéder au transfert des déchets d'une collecte primaire à une collecte secondaire et les coûts de ce transfert doivent être examinés en fonction du matériel utilisé dans chacune des phases.

De plus, il faut déterminer soigneusement la meilleure méthode pour le déchargement des véhicules primaires et le chargement du véhicule secondaire. Pour cela, il existe deux façons de procéder :

- le **transfert direct** qui consiste à simplement charger les déchets à la main ou à l'aide d'outils des véhicules primaires au véhicule secondaire. Cette technique, malheureusement trop souvent utilisée, est très peu efficace et pas hygiénique. Le transfert est très lent. On perd du temps (et de l'argent) parce qu'il faut synchroniser les véhicules. L'environnement est souvent pollué par des déchets qui s'échappent lors des opérations.

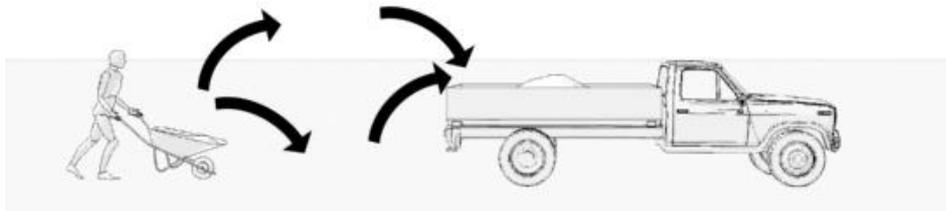


Figure 3.6 : Transfert direct

- le **transfert à deux niveaux** qui consiste à élever le véhicule de collecte primaire suffisamment haut que pour pouvoir déverser les déchets par gravité dans le véhicule secondaire ou dans un container. Ceci peut se faire en construisant une rampe, une fosse, ou simplement en profitant de la pente naturelle d'un talus. Le transfert est ainsi largement accéléré et beaucoup plus hygiénique. Le rendement économique est évidemment bien meilleur.

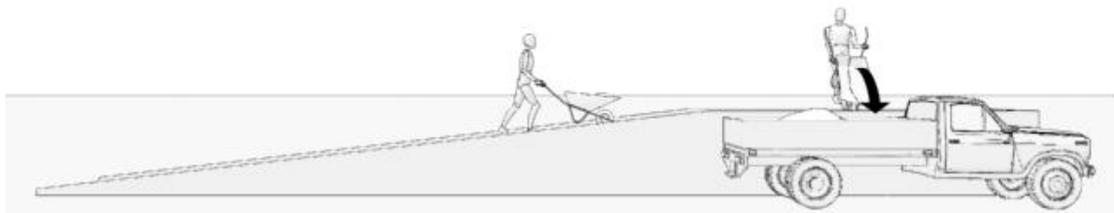


Figure 3.7 : Rampe de déchargement pour un transfert à deux niveaux

Remarque :

Une rampe en pente trop douce prend beaucoup de place. Une pente trop raide limite le poids contenu dans les véhicules primaires.

Pour en savoir plus sur la gestion des déchets :

H.C. Haan, A. Coad, I. Lardinois, 1999, *Gestions des déchets municipaux : Engager des micro-et petites entreprises*, traduction de F. Weijters-Bage, SKAT, Suisse.

Ouvrage destiné aux responsables de la gestion des déchets solides municipaux qui cherche à améliorer ce service ou à faire des économies. Il répond aux questions « pourquoi » et « comment » engager de petits groupes communautaires de base dans la collecte des déchets solides des rues, des ménages et des entreprises. Les auteurs se penchent essentiellement sur les situations rencontrées dans les pays à bas et moyens revenus et tirent de nombreux enseignements des expériences qui ont été faites en Amérique latine, en Asie du Sud-Est et en Afrique.

Cet ouvrage peut être obtenu à l'adresse suivante :

Intermediate Technology Publications Ltd.

103-105 Southampton Row, Londres WC1B 4HH, UK

tél. : + 44 171 436 9761

fax. : + 44 171 436 2013

e-mail : itpubss@gn.apc.org

www.waste.nl

Site de l'organisation non gouvernementale hollandaise WASTE, spécialisée dans la gestion des déchets solides dans les pays en développement. Certaines publications (en anglais) peuvent être directement téléchargées à partir du site internet (Integrated Sustainable Waste Management, UWEP). D'autres peuvent être commandées en s'adressant à Verele de Vreede, responsable de l'information (fax : + 31 182 550313 ; e-mail : vdevreede@waste.nl). Les prix varient entre 5 et 25 €.

Chapitre 4

La préparation physique des plastiques

1. Qu'est ce que la préparation physique ?

La préparation physique des plastiques est l'ensemble des étapes amenant les déchets plastiques à la forme de petits copeaux propres et secs, de taille acceptable pour être introduits dans des machines de mise en forme. Ces différentes étapes sont le tri, le lavage, le séchage et le broyage.

Le tri précède le broyage⁶. En effet, il est plus facile de séparer des gros morceaux que des petits. Le lavage et le séchage pourront par contre se faire à différents moments, selon le type de gisement traité et les technologies disponibles. Les différents cas de figure sont représentés dans le schéma suivant :

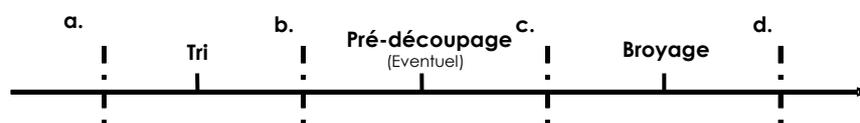


Figure 4.1 : Le lavage-séchage lors de la préparation physique des plastiques

a. Lavage avant le tri

Effectuer le lavage avant toute autre étape de traitement est l'option idéale pour réaliser le tri dans de bonnes conditions de travail et d'hygiène. Elle est pourtant peu pratiquée car elle nécessite de nettoyer tous les déchets, y compris ceux qui ne seront pas recyclés. Seules les filières valorisant une grande variété de plastiques ou ne traitant qu'un type de déchets bien défini peuvent se permettre cette pratique. Quoiqu'il en soit, un premier dégrassage à la source des déchets fortement souillés peut s'avérer nécessaire. Il peut être réalisé à sec à l'aide de brosses dures.

b. Décontamination avant le pré-découpage

Après le tri, le pré-découpage des déchets de grosse dimension ou n'accrochant pas aux lames du broyeur (bouteilles, flacons, ...) est une étape indispensable. Dans le

⁶ Il existe néanmoins une exception majeure : le cas d'un gisement constitué uniquement par deux types de plastiques dont les densités sont très différentes. Exemple : un mélange de PE et de PVC. Dans ce cas, il est intéressant de commencer par le broyage et d'effectuer ensuite la séparation par flottaison dans des grands bacs d'eau. Le PE, qui flotte dans l'eau, sera récupéré en surface alors que le PVC se retrouve au fond.

cas des flacons, notamment, il est préférable d'effectuer d'abord une étape de décontamination qui consiste à enlever les bouchons, retirer les étiquettes, vider les résidus et rincer correctement.

c. Lavage avant le broyage

Effectuer le lavage avant le broyage est l'option la plus simple et la plus pratiquée. Les déchets plastiques triés sont lavés manuellement dans des bassines d'eau froide ou tiède. L'utilisation de savon ou détergent facilite la tâche. Dans le cas de déchets fortement souillés, l'eau chaude peut s'avérer utile mais la température de l'eau reste limitée car les déchets sont manipulés à la main.

d. Lavage après le broyage

Le lavage après broyage consiste à agiter vigoureusement les flocons de plastiques broyés dans des bassines d'eau. Le frottement entre les particules décroche la crasse. Cette pratique permet un certain niveau de mécanisation. L'emploi d'eau très chaude et de détachants puissants tels que la soude (caustique ou potassique) est alors possible car les opérateurs ne sont pas en contact direct avec les matières. Il est toutefois nécessaire de respecter un minimum de règles de sécurité.

Méthode	Description	Avantages	Inconvénients
1. Lavage avant tri	Lavage systématique de tous les déchets collectés. Il peut se limiter à un simple dégrassage à sec à l'aide de brosses dures.	Hygiène pour les futurs traitements, notamment le tri. Le dégrassage à sec facilite le tri et diminue la quantité d'eau pour le futur lavage.	Lavage inutile des plastiques non-valorisés..
2. Décontamination avant découpage	Pratique spécifique au recyclage des flacons et des contenants qui consiste à retirer tous les éléments contaminants des flacons (étiquettes, bouchons, bagues, résidus, ...)	Limite la contamination (couleur et plastiques). Récupération et emploi possibles des résidus. Plus facile à réaliser avant qu'après découpage.	Étapes longues. Nécessite un peu d'investissement et de créativité. N'est réalisée que dans le cas de gisements importants de flacons.
3. Lavage avant broyage	Lavage par lot de déchets triés. Ce lavage est réalisé à la main et à l'eau avec ajout éventuel de savon ou de détergent.	Nécessite peu de matériel. Séchage rapide car surface peu importante. Un tri peut encore être réalisé après lavage.	Main d'œuvre importante. Travail pénible. Mécanisation difficile à envisager. Température de l'eau limitée.
4. Lavage après broyage	Lavage des copeaux résultant du broyage des déchets préalablement triés. Ce lavage peut s'effectuer dans de grands bacs d'eau (éventuellement chaude) avec ajout d'agents détachants puissants tels que la soude.	Mécanisation possible du procédé ce qui rend le travail plus confortable. L'utilisation d'eau très chaude et d'agents détachants facilite le dégrassage.	La mécanisation nécessite quelques investissements. Les frais de consommables sont également plus importants. Séchage plus lent car la surface à sécher est plus grande. Ne permet plus de séparation (sauf cas particuliers)

Tableau 4.1 : Récapitulatif des différentes possibilités de lavage.

Les filières classiques et les plus faciles à mettre en œuvre opèrent selon le schéma : tri(-décontamination-découpage)-lavage-séchage-broyage. Dans la suite du chapitre, les différentes étapes sont décrites dans cet ordre. Il importera à l'initiateur de projet de définir sa filière de traitement sur base de la caractérisation de son gisement et des critères précédents.

2. Localisation du centre de recyclage

Les opérations effectuées lors de la préparation physique des plastiques ainsi que celles de mise en forme (cf. chapitre 5) nécessitent un minimum d'espace et d'infrastructures spécifiés dans les prochains paragraphes. Avant de les mettre en œuvre, il faut bien s'interroger sur le lieu d'implantation du centre.

1. Pour des raisons de coût de transport déjà évoquées précédemment, on veillera à s'installer le plus au centre possible de la zone de collecte afin de réduire au maximum le déplacement des matières.
2. De même, la proximité des lieux où pourront être écoulées les matières recyclées est un atout : les entreprises de transformation pour les produits semi-finis (flocons, granulés,...), les marchés et zones commerciales pour les objets recyclés.
3. Par contre, il vaut mieux éviter de se situer dans une zone à forte densité de population. Le recyclage des déchets plastiques est en effet une activité qui génère des nuisances : bruits, vibrations, odeurs, poussières, ... Ceci n'est pas toujours évident, d'autant plus que les déchets sont généralement collectés dans ces zones. Les zones agricoles et d'élevage sont également déconseillées.

Outre ces considérations, le centre doit pouvoir disposer :

- d'un réseau électrique : type d'alimentation (monophasé – triphasé ?), tensions disponibles (110 V, 220 V, ... ?), facilité de raccordement, prix du kilowatt, fréquences des coupures de courant, ... En cas de coupures trop fréquentes, il faut recourir à un groupe électrogène.
- de l'accessibilité à l'eau. Le recyclage des plastiques nécessite en effet d'importante quantité d'eau pour le lavage des déchets : environ deux litres par kilo de déchets. Le coût de l'eau, son accessibilité et sa bonne gestion sont des facteurs qui peuvent être déterminants. Il est intéressant de pouvoir disposer d'un puits ou de se trouver à proximité d'une rivière. En milieu urbain, il faut souvent se contenter de l'eau de distribution (chère). Il est alors important de l'utiliser rationnellement et de la recycler au maximum.
- de l'accessibilité par des véhicules de tout type.

Remarque :

Dans les pays où le recyclage des plastiques est déjà bien introduit, toutes les étapes de préparation des plastiques peuvent ne pas être réalisées dans un seul centre, mais dans différents centres spécialisés dans l'une ou l'autre des disciplines. C'est ainsi qu'au Caire (Egypte) ou à Bangalore (Inde), il existe des centres de tri, de lavage, de broyage, ... entre lesquels les plastiques sont revendus à différents niveaux de préparation.

3. Le tri

Pourquoi trier ?

Les notions théoriques sur les polymères du premier chapitre ont montré que ceux-ci étaient immiscibles, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les fondre pour les recycler ensemble. Il est donc nécessaire de les trier avant de les recycler.

Bien qu'une multitude de procédés aient été inventés pour séparer automatiquement les plastiques entre eux, seul le tri manuel après reconnaissance visuelle permet d'obtenir une bonne qualité de séparation à des coûts raisonnables. Malheureusement, les plastiques se ressemblent et la reconnaissance n'est pas toujours évidente. Les différents critères donnés au premier chapitre seront fort utiles, mais il est certain que c'est avant tout l'expérience qui prime.

Dans le doute, il vaut mieux écartier un morceau de plastique que de vouloir absolument le valoriser, au risque de contaminer un lot et de compromettre la qualité des produits finis. Ceci se résume en une petite phrase que tout trieur doit garder à l'esprit :

« Dans le doute, on teste ! Si on doute encore après le test, on jette ! »

J.Vogler, 1984

Comment trier ?

Il n'y a pas de recette universelle pour trier les déchets plastiques. Le gestionnaire du centre de tri trouvera naturellement la méthodologie la plus adaptée à sa situation. Les paragraphes suivants donnent une idée des différentes séparations qu'il est possible de réaliser à partir d'un gisement hétérogène de déchets plastiques.

a. Tri par origine

Les déchets sont plus ou moins souillés selon leur provenance (*cf. chapitre 3*). Ainsi, les déchets collectés à la source sont toujours plus propres que ceux qui proviennent de la rue ou d'une décharge. Il est donc inutile de les mélanger.

Le tri selon l'origine des déchets plastiques se fait généralement spontanément à la réception des déchets par le centre. Les déchets fortement souillés pourront être dégrassés à sec à l'aide d'une brosse avant de subir un tri plus poussé. Celui-ci en sera grandement facilité.



Photo 4.1 : Réception de déchets collectés (Yaoundé, 2003)

Une fois le tri et le lavage terminé, les plastiques de même sorte, mais d'origines différentes peuvent être mélangés et transformés ensemble. Cette pratique est néanmoins peu courante. Les recycleurs préfèrent les garder séparés afin de pouvoir proposer des plastiques de différentes qualités (avec prix adaptés).

b. Tri par grande catégorie de déchets

Par grande catégorie de déchets, on entend : les films, les gros objets (chaises, casiers, bassins, ...), le flaconnage, les semelles de chaussures, ...

La séparation des déchets selon quelques catégories bien choisies est souvent intéressante pour diverses raisons :

1. Tous les déchets ne subissent pas nécessairement le même type de traitement (lavage, broyage, transformation). Ainsi, les films ne seront pas broyés en même temps que d'autres objets plastiques, même si ceux-ci sont faits à partir du même polymère. De même, les objets de taille supérieure à celle de l'ouverture du broyeur devront subir une étape supplémentaire de découpage (*cf. paragraphe ci-dessous*).
2. Les trieurs peuvent se spécialiser dans le tri d'une catégorie bien déterminée de déchets. L'expérience qu'ils acquièrent alors dans ce domaine permet d'améliorer grandement les rendements et les capacités de séparation.
3. La séparation des plastiques selon leur type de mise en forme est également une étape intéressante. En effet, certains additifs sont spécifiquement ajoutés aux polymères afin de leur donner des propriétés qui facilitent leur mise en forme : injection, extrusion, injection soufflage, ... (*cf. chapitre 5*). Les recycleurs préfèrent alors les séparer afin de conserver ces propriétés. Ils pourront vendre à leur tour des granulés de plastiques spécifiquement destinés à l'une ou l'autre technique de transformation.
Le critère de séparation est la cicatrice que conserve tout objet après sa mise en forme (*cf. chapitre 2*).
A Kinshasa, par exemple, les recycleurs demandent aux trieurs de séparer les capuchons (injection) de leurs flacons (injection-soufflage) afin de les recycler séparément.
4. Le « pré-triage » permet également d'éliminer une bonne partie des déchets « non-recyclables » parmi lesquels on retrouve :
 - les déchets trop souillés ;
 - les thermodurcissables et les élastomères (*cf. chapitre 1*) ;
 - les déchets intrus (métaux, bois, cartons, ...).
5. Au contraire, certains déchets peuvent être réutilisés (après remise en état) plutôt que d'être recyclés. Il est intéressant de directement les séparer des autres déchets. A Yaoundé (Cameroun), par exemple, 30 % des sandales collectées sont rénovées et revendues à la population dans le marché de seconde main.

Lorsque la collecte des déchets plastiques se fait par apport motivé, le pré-triage est généralement réalisé à la réception car les montants de la rétribution sont souvent fixés en fonction de leur catégorie.



Photo 4.2 : Tri des semelles (Kinshasa, 2003)

c. Tri par sorte de plastique

La différenciation des plastiques par sorte se fait en utilisant les critères largement décrits au *chapitre 2*. En général, 90 % des plastiques peuvent être directement reconnus sur base de l'expérience des trieurs. Ils seront donc rapidement séparés. Les 10 % restant devront nécessairement être testés pour pouvoir être recyclés. Les tests prennent évidemment beaucoup de temps et ralentissent fortement la production.

En général, les grandes sortes de plastiques (PEHD, PEBD, PP, PVC, PS) sont triées en premier lieu. Les autres sont stockées dans un container en vue d'une future séparation si des débouchés pour ces produits existent. Ne pas oublier de bien écarter les thermodurcissables et les caoutchoucs qui sont très peu appréciés par les recycleurs et peuvent dévaloriser les lots de plastiques triés.

d. Tri par couleur

Enfin, le tri par couleur est l'ultime étape de tri qui peut être réalisée. C'est évidemment une des plus faciles, mais sans laquelle les plastiques recyclés auraient des couleurs grisâtres ou brunâtres, difficiles à écouler.

Toutes les variétés de couleurs ne doivent pas être séparées. En général, on les regroupe selon un certain nombre de tons, par exemple :

- les clairs ;
- les blancs ;
- les rouges, jaunes, oranges, ...
- les bruns, noirs, verts, ...
- les bleus.

Une fois broyés, mélangés et regranulés, on obtiendra des couleurs relativement homogènes. Pour les films, il est indispensable de faire au minimum la différence entre les colorés et les transparents dont la valeur de reprise peut être nettement plus importante.

Mise en œuvre du tri

Le tri est un travail éprouvant. Il est donc conseillé de se mettre dans les meilleures conditions de travail en évitant, par exemple, de travailler à même le sol. Des tables de tri peuvent être aménagées dans des locaux couverts. Certains centres bien équipés disposent de bandes transporteuses. Les plastiques circulent ainsi devant les

trieurs dont le travail consiste à extraire un type de plastiques bien précis. Les plastiques restants sont alors testés par d'autres trieurs.

Le mise en tas à même le sol des plastiques triés est à proscrire : elle entraîne des contaminations et les plastiques peuvent se mélanger nouveau. Il est indispensable de toujours les déposer dans des bacs ou des sacs !

Ressources humaines :

L'expérience des trieurs est capitale. Deux semaines d'apprentissage sont généralement suffisantes pour qu'une personne puisse être efficace dans un centre de tri. Lors de sa formation, le nouveau trieur commencera d'abord par séparer les plastiques par couleur afin de se familiariser avec le métier. Il s'initiera ensuite au tri des plastiques par sorte en apprenant à maîtriser les tests de reconnaissance.

Il est difficile de chiffrer la capacité de production journalière d'un trieur. Elle dépend en effet d'un grand nombre de facteurs : types de plastiques à séparer, conditions locales, ... Ainsi, la séparation des films, peu denses, est beaucoup plus lente que celle des gros objets. De même, le rythme et les horaires de travail peuvent varier sensiblement d'un pays à l'autre. Pour donner un ordre de grandeur, on peut considérer qu'une personne peut trier à elle seule environ 80 kg de déchets plastiques par jour. Il n'est pourtant pas rare de trouver des personnes capables d'atteindre 160 kg de plastiques triés par jour.

Le tri est un travail routinier et lassant pour lequel il est difficile de rester attentif. Après quelques heures, certaines erreurs peuvent être commises. La qualité du tri s'en retrouve directement affectée c'est pourquoi il est important de pouvoir s'en rendre compte et de prendre quelques minutes de repos.

Lorsqu'un lot de plastiques a été trié, un des meilleurs trieurs doit effectuer un contrôle afin d'apprécier sa qualité. Une erreur de 5 % de thermoplastiques mal triés peut être acceptée (un plastique sur 20). Dans le cas contraire, le lot doit être retriés. La tolérance pour les thermodurcissables ou les caoutchoucs est bien inférieure.

Matériel :

1. Des cutters, couteaux ou autres outils tranchants permettent d'ouvrir les sacs de conditionnement. Des paires de gants sont indispensables pour la manipulation des déchets et des masques évitent l'inhalation de poussières.
2. Tout le matériel nécessaire pour effectuer les tests de séparation :
 - test de la flamme : un outil tranchant, un briquet, une surface inflammable (cendrier, par exemple), un fil de cuivre pour la reconnaissance du PVC.
 - test de densité : des récipients transparents, un outil tranchant, du sel, de l'alcool (éthanol, méthanol voir propanol), un densimètre.
 - thermo-plastique/durcissables : un fil métallique et un briquet.
3. Pour le conditionnement, des grands sacs font l'affaire. Des étiquettes mentionnant les plastiques qu'ils contiennent doivent être apposées. Des grands bacs sont parfois utilisés pour les étapes intermédiaires de tri.
4. Toujours posséder une balance afin de pouvoir peser les plastiques triés. Le poids permettra de chiffrer leur valeur et d'établir les bilans du traitement. Les « balances à tirant » sont les plus faciles à manipuler si des sacs servent au conditionnement. Si des bacs sont utilisés, on préférera alors des « balances à plateau ».



Photo 4.3 : Tri et conditionnement de déchets plastiques (Yaoundé, 2003)

5. Toutes les idées sont bonnes pour améliorer les conditions de tri : conception de tables de tri, convoyage des déchets, ... Il peut également être intéressant de se constituer une base de donnée des objets plastiques fréquemment rencontrés. Un exemplaire de chaque sorte peut par exemple être placé en évidence sur une étagère avec une étiquette indiquant clairement le plastique à partir duquel il est fait.



Photo 4.4 : Table conçue pour le tri des déchets plastiques (Cuernavaca, 1998-2002)

6. Un espace ou un container doit être alloué aux résidus ultimes, c'est-à-dire tous les déchets non-valorisables, dont la quantité varie selon le type de système de collecte mis en place. En moyenne, il faut compter qu'une dizaine de pourcents des déchets collectés ne pourront être recyclés. Il faudra donc s'en débarrasser de la meilleure manière possible, l'idéal étant d'avoir une décharge à proximité du centre de tri. Il est possible que certains déchets ne trouvent pas de valorisation à un moment donné, mais bien dans un futur proche. Il est alors judicieux de les stocker afin de pouvoir les recycler dès que la filière de valorisation voit le jour.

Remarque importante :

Les déchets plastiques comme tous les déchets ont tendance à véhiculer des maladies infectieuses. Ils sont en effet une niche idéale pour les mouches, les moustiques et les rongeurs. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le tri est effectué avant le lavage. Les trieurs étant alors directement en contact avec les stocks de déchets, il est recommandé qu'il soit en correctement vaccinés (tétanos, hépatite, rage, ...).

4. Le lavage et le séchage

Le lavage est une étape capitale dans un projet de recyclage. La présence d'impuretés peut fortement affecter la qualité des produits recyclés, et donc les prix de revente. Tous les déchets plastiques doivent être nettoyés à l'exception peut-être de certains déchets industriels ayant un degré de souillure très faible. Pour d'autres, une étape préalable de décontamination est parfois nécessaire. C'est le cas des flacons auxquels la première partie du chapitre est consacrée.

Enfin, un séchage poussé est indispensable car les machines de recyclage des plastiques exigent de travailler avec des matières ne contenant plus de traces d'humidité.

Décontamination :

La décontamination est un traitement lié au recyclage des flacons.

Traditionnellement, ceux-ci sont composés d'un corps principal, d'un bouchon et d'une ou plusieurs étiquettes. De plus, ils contiennent souvent un résidu qu'il faut vidanger.

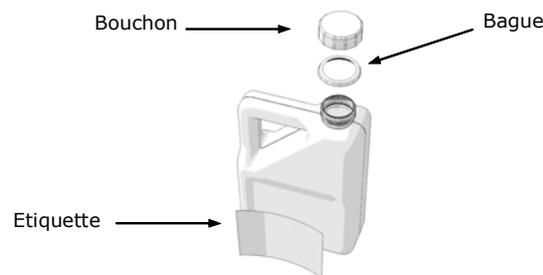


Figure 4.2 : Décontamination des flacons

a. Vidangeage

Il est parfois intéressant de vidanger les flacons et d'en récolter les résidus. C'est le cas des flacons ayant contenu des détergents, du savon, du shampoing et autres produits détachants. Après un rinçage à l'eau chaude, l'eau savonneuse sera utilisée dans les bacs de lavage.

Les flacons ayant contenu des huiles pourront être vidangés en les retournant simplement sur une tôle ondulée placée au soleil (cf. figure ci-dessous).

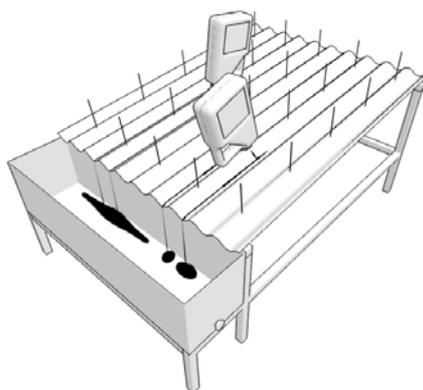


Figure 4.3 : Récupération de l'huile des flacons

L'huile ainsi récoltée dans un bac peut servir de lubrifiant pour les différentes machines de transformation par exemple (cf. chapitre 5). Cette pratique a été largement exploitée à Cuernavaca (Mexique).



Photo 4.5 : Récupération de l'huile de flacons. (Cuernavaca, 1998-2002)

b. Débouchonnage

Il est nécessaire de retirer les bouchons et leur bague. Ils ont généralement une couleur différente de celle du flacon et peuvent être faits à partir d'un autre type de plastiques. Ils seront évidemment identifiés, triés et lavés afin d'être recyclés à part.

c. Désétiquttage

Deux types d'étiquette peuvent être apposés sur les flacons : les étiquettes en papier qui sont collées et les films plastiques imprimés qui entourent le flacon. Les étiquettes en film plastique peuvent être facilement retirées à l'aide d'un cutter.

Les étiquettes en papier sont les plus difficiles à retirer. A froid, elles se déchirent et laisse une fine pellicule de papier. Il est préférable de les laisser tremper dans de l'eau chaude pendant un certain laps de temps.

Une autre technique est de réchauffer le flacon par l'intérieur avec de la vapeur afin de ramollir la colle. L'étiquette se retire alors facilement et en une pièce. La colle résiduelle sur le flacon peut être acceptée. La figure ci-dessous illustre une manière possible d'introduire de la vapeur dans les flacons.

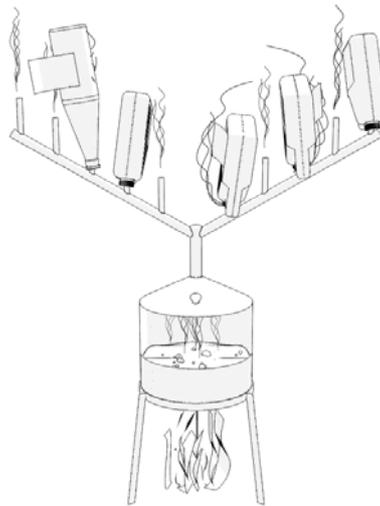


Figure 4.4 : Désétiquetage de flacons à la vapeur

Lavage

De même que le tri, le lavage est une étape de traitement nécessitant une main d'œuvre importante. Il s'agit donc de ne pas pousser le lavage jusqu'à la propreté impeccable, mais de trouver le bon compromis pour obtenir la qualité requise. Les différentes techniques de lavage sont décrites ci-après en ordre croissant de qualité de lavage, mais inévitablement aussi de coûts.

a. **Brossage à sec**

Lorsque les déchets sont trop souillés, notamment par du sable, de la terre ou des résidus organiques (déchets provenant des rues, parcs, décharges, ...), un premier décrassage à sec permet de ne pas trop polluer les eaux de lavage (pour économiser l'eau).

Le décrassage se fait généralement à l'aide de brosses à poils durs. Cette pratique émet beaucoup de poussière dans l'air. Il est donc indispensable de se munir d'un masque pour éviter toute inhalation.

b. **Lavage manuel**

Le lavage manuel se fait dans de grands bassins ou des demi-fûts d'une capacité minimale 100 litres.

Selon la ténacité de la souillure à nettoyer, différentes pratiques peuvent être mise en œuvre :

1. Pour des déchets propres, simplement souillés par de la terre ou de la poussière, un lavage à l'eau froide est suffisant. Les plastiques sont vigoureusement frottés avec des brosses à poils durs.
2. Pour les déchets fortement souillés et gras, le lavage doit se faire à l'eau chaude avec ajout de savons ou de détergents. La température de l'eau reste limitée car les déchets sont brossés à la main.
3. Lorsque l'emploi de détergents ne suffit pas, on peut également utiliser de la soude caustique (NaOH) ou de potasse caustique (KOH), notamment pour éliminer les graisses et les huiles résiduelles. Un temps de séjour de quelques heures (parfois plus d'une journée) dans des bacs permet de décroasser correctement les déchets. Ils sont ensuite frottés et correctement rincés. Cette pratique est néanmoins déconseillée pour le lavage manuel car ces produits sont relativement dangereux à manipuler. Si cette option est toutefois retenue, il importe de prendre en compte les considérations mentionnées dans le cadre suivant.

Précautions pour l'emploi de soude

En cas d'utilisation de NaOH ou de KOH, veiller à effectuer le lavage avec des longs gants en caoutchouc, solides et sans trou ainsi que des tabliers imperméables et des lunettes de protection. Eviter également toute éclaboussure.

En cas de contact avec la peau ou les yeux, rincer directement à l'eau claire pendant une dizaine de minutes.

Lors de la mise en solution, éviter toute inhalation ou ingestion. En cas d'inhalation, respirer de l'air frais. En cas d'ingestion, boire beaucoup d'eau.

Si des gênes ou des douleurs persistent, consulter un médecin.

Ressources humaines :

La capacité journalière de lavage d'une personne est très variable. On peut estimer qu'elle est comprise entre 50 et 100 kg selon le degré de souillure des plastiques, le type de lavage effectué et les conditions locales de la main d'oeuvre.

Le lavage ne demande pas de personnel aussi expérimenté que le tri. Le travail n'en est pas moins éprouvant et toutes les solutions permettant de le rendre plus facile peuvent être envisagées. Ainsi, il est préférable de permettre aux laveurs de travailler debout, voir assis, sans devoir trop se courber. De même, l'alimentation en eau via une cuve de stockage placée en hauteur permet d'éviter le remplissage lent et fatigant des bassins de lavage avec des seaux.

Lors de la manipulation des déchets (avant et après lavage), il faut bien veiller à ne pas mélanger les plastiques déjà triés.

Matériel :

1. Des bassines ou grands bacs de lavage d'une capacité minimale de 100 litres. L'expérience montre que beaucoup de centres utilisent des fûts coupés en deux sur lesquels deux anses sont soudées. Il en faut au moins un par laveur. Des seaux et des tuyaux sont également nécessaires pour véhiculer l'eau.

2. Des brosses à poils durs, des gants étanches, des tabliers imperméables, des lunettes de protection (en cas d'utilisation de soude), des tabourets et tout autre matériel facilitant le travail des laveurs.
3. Un système de chauffe-eau en cas de lavage à l'eau chaude.
4. Des sacs perméables ou des bacs perforés pour égoutter les plastiques lavés avant de les sécher.



Photo 4.6 : Lavage à la soude
(Cuernavaca, 1998-2002)

Consommables :

Le principal consommable pour le lavage est l'eau. On considère qu'il en faut environ 2 l./kg de plastiques.

1. La quantité de détergent ou savon dépend de la qualité de ceux-ci. Les détergents sont des produits coûteux : on fera donc attention à ne pas les gaspiller. En général, les détergents en poudre sont moins chers que les détergents liquides. Lorsque des résidus de détergents peuvent être récupérés des flacons collectés, on les utilisera en priorité. L'ajout de détergents complémentaires ne se fait que si nécessaire.
2. La soude caustique (NaOH) ou la soude potassique (KOH) sont des produits d'utilisation courante dans les entreprises. Il est donc normalement possible de s'en procurer facilement. Leur prix peut néanmoins varier sensiblement en fonction de la situation géographique et de la quantité commandée. Ainsi, une tonne de NaOH coûte moins de 300 € (soit 0,3 €/kg) dans pratiquement tous les ports, le sac de 25 kg coûte 15 € à Lomé, Togo (soit 0,6 €/kg) et le sachet d'un kilo revient à 2,25 € dans les marchés de Kinshasa (RD Congo).
La quantité à utiliser dépend évidemment de la souillure des plastiques à laver. Par sécurité, il vaut tout de même mieux ne pas dépasser certaines concentrations. A titre d'information les laveurs égyptiens utilisent environ 12,5 g de KOH par litre d'eau.

Gestion de l'eau :

On l'a vu, l'eau est utilisée en grande quantité pour le lavage. A titre d'exemple, le lavage de 500 kg de plastiques par jour nécessite environ 1 m³ d'eau. Sa bonne gestion peut permettre de diminuer sensiblement les coûts.

Une première considération est l'accessibilité à l'eau. Plusieurs possibilités d'approvisionnement existent :

- Une manière très simple de disposer d'eau bon marché est de collecter l'eau de pluie dans des fûts de grande capacité. Ceci n'est évidemment valable que dans les pays où les précipitations sont régulières et abondantes. Quoi qu'il en soit, une autre source d'approvisionnement doit venir en complément afin de pallier au manque d'eau durant les périodes sèches.
- Si la situation le permet, la possibilité d'avoir un puit est évidemment intéressante. L'extraction de l'eau avec un seau est trop éprouvante, voire impossible pour les débits requis. Il est plus raisonnable d'utiliser une pompe. Pour des débits raisonnables (10 à 20 l/min), des pompes manuelles⁷ peuvent être utilisées. Pour des débits supérieurs, une pompe électrique est nécessaire.
- Le lavage des plastiques ne nécessite pas une eau de qualité. Une eau claire de rivière peut tout à fait convenir.
- Enfin, lorsque aucune autre source d'approvisionnement n'est accessible, on doit se résoudre à utiliser de l'eau de distribution, dont le prix influencera directement les coûts du lavage. Une attention particulière devra alors être portée afin de ne pas la gaspiller.

Une seconde manière de bien gérer l'eau est de pratiquer un « lavage à contre-courant ». Celui-ci consiste à faire passer les déchets dans une série de bacs successifs dont l'eau est de plus en plus propre. Au contraire, l'eau circule dans l'autre sens, c'est-à-dire du bac le plus propre vers le bac le plus sale. Ainsi, l'eau sale sert à décroasser les déchets sales et l'eau propre sert à parfaire le travail.

Les bacs sont placés de préférence en escalier afin que l'eau puisse circuler par gravité. Les déchets, quant à eux, sont remontés de bassin en bassin par les laveurs jusqu'à ce qu'ils aient la propreté requise.

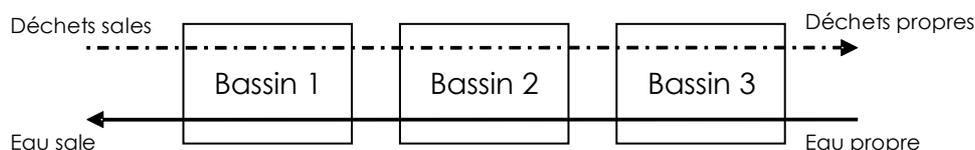


Figure 4.5 : Principe du lavage à contre-courant

Enfin, le traitement des eaux usées est une manière efficace de limiter la consommation d'eau. Lorsque la souillure des plastiques est principalement constituée de sable ou de terre, ceci peut se faire facilement en évacuant toutes les eaux usées dans un bac ou un bassin de sédimentation.

Leur principe est très simple. Les eaux chargées de particules plus ou moins fines se retrouvent à l'état de repos. Les particules sédimentent et se déposent au fond du

⁷ Un « Guide de fabrication d'une pompe à godets » est proposé par Ingénieurs Assistance Internationale – Ingénieurs Sans Frontières (Belgique). Une version allégée est disponible sur internet (www.isf-iai.be). La version complète peut être reçue sur simple demande.

bassin. L'eau de surface, alors claire, est récupérée par débordement. Lorsque la couche de boue au fond du bassin est trop épaisse, il faut procéder au vidangeage de l'eau et à l'évacuation de la boue. Le bassin est alors de nouveau opérationnel.

c. Lavage de flocons

L'utilisation d'eau très chaude pour le lavage n'est pas évidente pour les déchets bruts. Elle est par contre très facile lorsque ceux-ci sont déjà broyés (cf. paragraphe 5). Les flocons de plastique peuvent être placés dans des bacs d'eau bouillante à laquelle est ajouté du détergent ou de la soude. Un brassage régulier provoque des frottements entre les plastiques qui arrachent la crasse. Après un temps de séjour plus ou moins long (plusieurs heures pour les bains de soude), les flocons sont extraits des bacs à l'aide de grandes écumeuses. Après un rinçage à l'eau claire, ils peuvent être séchés.

Séchage

Lors du recyclage, les plastiques sont fondus dans des machines appropriées (cf. chapitre 5). Quelle que soit leur sorte, leurs températures de fusion sont supérieures à 100 °C, donc à la température d'ébullition de l'eau. Ainsi, si les plastiques sont introduits humides dans ces machines, l'eau va se retrouver à l'état de vapeur et former des bulles dans le plastique recyclé. La vapeur peut également modifier les propriétés chimiques des plastiques. De plus, si l'humidité est importante, l'expansion lors de l'évaporation peut provoquer des perturbations mécaniques importantes entraînant des casses aux machines.

On le voit, le séchage est indispensable et ce, jusqu'à un taux d'humidité très faible (inférieure à 0,1 % !).

A titre d'information, le taux d'humidité est la quantité d'eau, exprimée en pourcents, que contient la matière. On le détermine en pesant un échantillon avant et après séchage⁸ :

$$\text{Humidité (\%)} = \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{humide}}} \times 100$$

avec,

m_{humide} : le poids de matière avant séchage
 m_{sec} : le poids de matière après séchage

La quantité d'eau que peut retenir la matière est proportionnelle à la surface spécifique. Celle des objets plastiques est nettement inférieure à celle des flocons de plastiques broyés. Il y a donc lieu de considérer leur séchage séparément.

a. Séchage d'objets

La forme et la taille des objets plastiques lavés ne permettent pas d'envisager une mécanisation poussée de leur séchage. Après égouttage, différents types de

⁸ Théoriquement, un échantillon représentatif de matière doit être chauffé pendant une heure dans un four à 105 °C.

séchage peuvent être mis en œuvre. Quoiqu'il en soit, le temps de séchage dépend toujours des deux paramètres que sont la température et la ventilation.

1. Le séchage au soleil : l'énergie solaire est évidemment la moins chère dans les pays où l'ensoleillement est important. Les films peuvent être pendus à des fils, comme du linge. Les objets seront plutôt étalés et régulièrement retournés afin d'exposer toutes leurs faces au soleil. Le fait de les disposer sur des grilles ou des filets en hauteur permet de terminer l'égouttage. Toute l'eau égouttée n'est plus à sécher.
2. La ventilation : lorsque le soleil ne suffit pas et que le vent est faible, une ventilation artificielle (ventilateur) permet d'accélérer le séchage.
3. Un local ventilé : dans les régions où le séchage en plein air n'est pas possible, il n'y a pas d'autre solution que de sécher dans des locaux. Un simple préau peut suffire. Il assurera la ventilation indispensable pour limiter le temps de séchage.
4. L'air chaud : le séchage par air chaud permet de se rendre indépendant des conditions climatiques. Différentes techniques sont possibles (canons à chaleur, sècheurs électriques, autres conceptions artisanales, ...). Toutes combinent une source de chaleur (brûleur, résistance électrique, ...) et un système de ventilation. Ces techniques ont évidemment un coût qu'il faut calculer.

b. Séchage de flocons

Le séchage de flocons peut être plus facilement mécanisé. Ainsi, après un bon égouttage, les flocons mouillés peuvent être essorés dans desessoreuses à panier. Une machine à lessiver récupérée peut faire l'affaire. Des flocons égouttés d'une taille comprise entre 4 et 10 mm ont une humidité d'environ 5 %. Après un essorage d'une minute dans le panier d'une machine à lessiver, l'humidité est ramenée à 0,5 %. Les flocons peuvent alors être complètement secs en moins d'une heure d'exposition au soleil. Il faut compter que l'on peut en étendre environ 15 kg/m². Afin d'éviter de devoir nettoyer le panier à chaque essorage, on peut placer les flocons dans des sacs en toile de jute. Ceci permet également d'éviter des pollutions lorsque des flocons de plastiques de sortes ou de couleurs différentes restent dans le tambour.

Si la météo ne permet pas d'envisager un séchage au soleil, différentes solutions peuvent être trouvées : surface couverte et ventilée ; séchage à l'air chaud ...



Photo 4.7 : Séchage à l'air chaud de flocons de plastiques (Cuernavaca, 1998-2002)

Pour en savoir plus sur le séchage :

Pour réaliser une installation de séchage, il est possible de s'inspirer d'un des nombreux ouvrages publiés sur le séchage des denrées alimentaires tel que le « Guide d'aide à la décision pour la création d'unités artisanales de séchage agroalimentaire », édité par le GERES (Groupe Energies Renouvelables et Environnement).

40, rue Saint Jacques
13006 Marseille (France)
Tel: 00 33 (0)4 91 37 21 53
Email : eie.marseille@free.fr
<http://geres.free.fr>

Ce guide contient :

- une description de la méthodologie à adopter pour la réalisation d'une installation de séchage ;
- des fiches techniques des principales technologies de séchage ;
- des pistes de réflexion pour optimiser l'activité de séchage.

Il est disponible en version française et anglaise pour la somme de 19 € + 5 € de frais d'expédition (bon de commande téléchargeable).

Un autre guide intéressant s'intitule « *Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes* », publié par le GRET (Groupe de Recherche et d'Echange Technologique).

211-213 rue La Fayette 75010 Paris-France
Tél : 00 33 (0)1 40 05 61 61
Fax : 00 33 (0)1 40 05 61 10
E-mail : gret@gret.org
web : <http://www.gret.org>

Ce guide donne des éléments méthodologiques et pratiques pour démarrer ou améliorer une activité de séchage solaire. Il propose également des fiches synthétiques sur les séchoirs existants.

Il est disponible pour la somme de 3,8 € + 3,05 € de frais d'expédition.

5. La réduction de taille

Pré-découpage

Le pré-découpage est une étape indispensable avant le broyage des déchets volumineux, ainsi que des objets creux qui ont du mal à être pris entre les lames des broyeurs (flacons, bidons, ...). De plus, après découpage, la densité des déchets est largement supérieure à la densité initiale, ce qui améliore le rendement des broyeurs.

Pour limiter les frais de transport, le pré-découpage doit être réalisé le plus en amont possible, notamment en cas de long déplacement entre les lieux de collecte et le site de broyage. Il peut se faire par exemple sur des sites de rassemblement ou de transfert des déchets.

a. les couteaux

Les outils de découpe les plus accessibles et les moins chers sont évidemment les couteaux ou tout autre objet tranchant tels que les cutters ou les machettes. Leur emploi est toutefois éreintant et ne permet pas d'envisager une cadence de production importante. De plus, dès que l'épaisseur des objets à découper est importante, le découpage devient très difficile à réaliser.



Photo 4.8 : Pré-découpage manuel au couteau (Caire, 1994)

Une solution est de fondre partiellement le plastique en chauffant la lame. Ceci se fait au détriment de la qualité du plastique qui s'en retrouve dégradé.



Photo 4.9 : Découpage de déchets plastiques (Cuernavaca, 1998-2002)

b. les ciseaux

Les ciseaux sont une solution alternative bon marché pour le découpage. Plutôt que la simple paire de ciseaux traditionnelle qui limite vite les possibilités de découpe, on

préfèrera un système fixé sur un support robuste et muni d'un bras de levier suffisamment long.



Photo 4.10 : Découpage aux ciseaux de déchets plastiques (Cuernavaca, 1998-2002)

Au Caire, ce type d'outil permet de découper environ 50 kg de déchets plastiques à l'heure.

c. la scie sauteuse ou rotative

Les scies sauteuses ou rotatives sont des outils de découpe beaucoup plus confortables. Etant largement utilisées dans les ateliers de travail du bois, on en trouve facilement et à des prix raisonnables.

d. la cisaille rotative

Lorsque le flux de déchets le permet, on peut envisager d'effectuer le découpage (ou déchiquetage) à l'aide d'une cisaille rotative⁹. Ces machines sont constituées de deux axes tournant à contresens et munis de couteaux dentés. Une fois happés par les dents, les produits sont déchiquetés en languettes.



Photo 4.11 : Principe de la cisaille rotative

Les cisailles rotatives peuvent découper des objets volumineux tels que des fûts, des plaques ou des emballages. La dimension des particules déchiquetées dépend de la largeur des couteaux. Celle-ci est rarement inférieure à une dizaine de millimètres. La vitesse de rotation des axes est relativement lente (comprise entre 50 et 80 tours par

⁹ En anglais, les cisailles rotatives se traduisent par « shredders », mais ce vocable s'est généralisé pour toute une série de machines. Il vaut donc mieux visualiser l'appareil soit directement, soit par photographie avant de se le procurer.

minute). La puissance¹⁰ installée pour découper des déchets plastiques doit être au minimum de 7 kW. Le débit (kg/h) peut être approximativement calculé en multipliant la puissance (kW) par 25 :

$$\text{Débit (kg/h)} = \pm 25 \times \text{Puissance (kW)}$$

La durée de vie des couteaux est d'environ 1000 h. de travail mais ils peuvent être affûtés à plusieurs reprises.



Photo 4.12 : Découpage d'un fût à la cisaille rotative

Certaines machines sont équipées de 3 ou 4 axes. De plus, elles peuvent être munies d'une grille perforée. La dimension des perforations détermine la taille maximale des particules. Dans ce cas, il faut veiller à ce que la largeur des couteaux soit supérieure à la dimension d'ouverture (minimum 12 à 15 mm). Les débits doivent être revus à la baisse. Plusieurs passages de la matière sont alors recommandés, avec diminution de la taille des ouvertures de grille à chaque étape.

Caractéristiques	Unités	
Nombre d'axes	-	(1) 2 (3 ou 4)
Largeur des couteaux	mm	> 10
Vitesse de rotation des axes	tours/min.	50 à 80
Puissance	kW	Min. 7 kW ; max. > 100 kW
Débit	kg/h.	± 25 x puissance
Ouverture des grilles	mm	> 12

Tableau 4.2 : caractéristiques générales des cisailles rotatives (shredders)

Broyage

L'étape du broyage amène les matières plastiques de l'état de fragments à l'état de « flocons », c'est-à-dire, de petits morceaux bien calibrés et de taille adéquate pour être introduits dans des machines de transformation (extrudeuses, presse d'injection, ...).

Le broyage des matières plastiques s'effectue par cisaillement dont le principe est illustré à la figure ci-dessous.

¹⁰ La puissance de certains modèles est exprimée en chevaux (CV). Pour information, 1 CV = 0,746 kW.

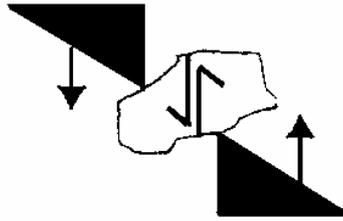


Figure 4.6 : Principe du « broyage par cisaillement »

Dans les broyeurs de plastiques, le cisaillement est produit par des outils coupants, les couteaux, entraînés par un moteur. Il existe typiquement deux sortes de broyeurs qui diffèrent par l'orientation de l'axe qui entraîne les couteaux.

a. Broyeurs à axe horizontal

Ces broyeurs sont constitués d'un cylindre horizontal à rotation rapide sur lequel sont montés des couteaux. Le cisaillement est produit entre ces couteaux mobiles et des couteaux fixés au châssis du broyeur. Une grille, placée sous les couteaux, détermine la dimension de sortie des fragments broyés. Les fragments de plastiques restent dans la zone de broyage jusqu'à ce que leur dimension soit plus petite que celle des perforations de la grille.

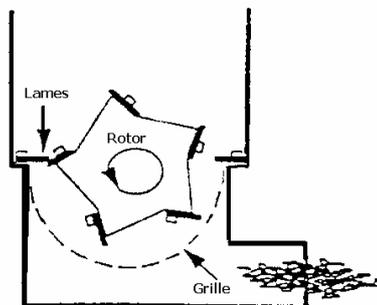


Figure 4.7 : Principe du broyeur à couteaux à axe horizontal

Le rotor est actionné par un moteur électrique via une courroie de transmission. La vitesse de rotation est généralement comprise entre 250 et 600 tours/minute. Afin d'éviter au moteur d'avoir à subir de trop gros chocs, un volant d'inertie peut être placé à l'autre extrémité de l'axe.

Selon les machines, le nombre de couteaux mobiles varie de 2 à 6 (typiquement 3 ou 4). Les couteaux fixes sont généralement au nombre de 2. Pour un bon rendement de broyage, il est important de veiller à ce que l'espace entre les couteaux fixes et mobiles soit le plus petit possible. De plus, les couteaux doivent être régulièrement aiguisés, ou remplacés lorsqu'ils sont trop usés. Une bonne qualité d'acier permet d'allonger leur durée de vie qui tourne autour des 1000 h. de production.

Un moteur 5 kW est le strict minimum pour un bon broyage des matières plastiques mais une motorisation supérieure à 10 kW est conseillée. En bonne approximation, on estime que le débit horaire de ces machines est égal à 10 fois la puissance du moteur :

$$\text{Débit (kg/h)} = \pm 10 \times \text{Puissance (kW)}$$

Une alimentation régulière est nécessaire. Il est déconseillé de laisser tourner le broyeur à vide.

Vu la puissance installée, une attention particulière doit être portée sur l'alimentation électrique. Un système automatique de démarrage peut s'avérer nécessaire pour les grosses machines. De plus, un système d'arrêt d'urgence bien visible (gros bouton rouge) doit permettre d'arrêter rapidement la machine en cas de problème.

Caractéristiques	Unités	Valeurs
Nombre de couteaux	-	2 à 6
Durée de vie des couteaux	h.	± 1000
Vitesse de rotation des axes	tours/min.	250 à 600
Puissance	kW	> 5
Débit	kg/h.	10 x puissance
Ouverture des grilles	mm	> 4 mm

Tableaux 4.3 : caractéristiques générales des broyeurs à axe horizontal

La zone de broyage est protégée par un carénage en métal (cf. figure 4.8). La partie supérieure sert de zone d'alimentation. Sa géométrie en angle droit et un volet souple permettent de protéger l'opérateur du retour de particules projetées par le rotor du broyeur. Il faut aussi veiller à ce que la zone d'alimentation soit suffisamment haute pour qu'il ne soit pas possible de toucher les couteaux. Une charnière doit permettre de la faire pivoter afin d'accéder au rotor pour le nettoyage ou l'entretien du broyeur.

Le tout doit être monté sur une charpente suffisamment haute que pour pouvoir récupérer les flocons de plastiques dans des bacs.

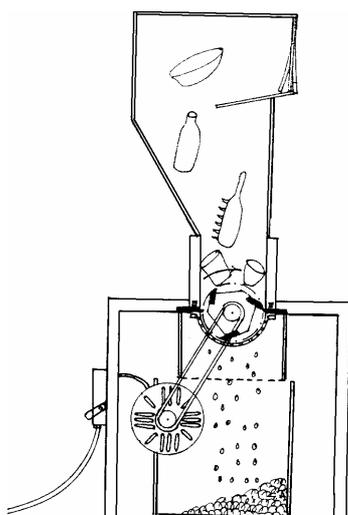


Figure 4.8 : Broyeur à axe vertical (Jon Vogler)

Le broyage est une étape de préparation coûteuse, notamment en énergie. Il est donc recommandé d'éviter autant que possible le surbroyage en choisissant judicieusement la dimension des perforations de la grille. Celle-ci est généralement comprise entre 4 et 10 mm selon la taille des particules que peuvent accepter les machines de transformation.



Photo 4.13 : Zone de broyage d'un broyeur à axe horizontal

Il est parfois possible que le broyage provoque un échauffement des plastiques suffisamment important que pour les fondre. Ceci arrive généralement lorsque les plastiques introduits dans le broyeur sont de grande taille, et que les perforations de la grille sont très petites. Le temps de séjour des plastiques dans la zone de broyage est alors trop long. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de procéder en plusieurs étapes avec des grilles dont les perforations sont successivement plus petites.

Un opérateur ayant un minimum d'expérience en mécanique suffit pour s'occuper du bon fonctionnement d'un broyeur à couteaux. Lorsque la production est importante, une deuxième personne pourra le seconder afin de gérer les flux de matières.



Photo 4.14 : Récupération des flocons de plastiques broyés (Caire, 1994)

Les plastiques triés doivent être broyés par campagne, c'est-à-dire, par sorte et par couleur. Après chaque campagne, un nettoyage complet de la machine doit être réalisé afin de ne pas contaminer la campagne suivante. Les flocons de plastiques

récupérés sont stockés dans des sacs sur lesquels sont apposées des étiquettes donnant les caractéristiques du produit.

Remarque :

Le broyage est une activité bruyante ! Le broyeur doit donc être installé dans un local le plus insonorisé que possible. L'opérateur devra se munir de protection contre le bruit (casque, bouchons, ...). De plus, si le centre est situé en milieu urbain, il faut veiller à respecter des horaires acceptables pour la population environnante.

b. Broyeurs à axe vertical

Les broyeurs à axe vertical sont beaucoup moins efficaces que les broyeurs à axe horizontal. Ils sont pourtant largement diffusés dans certains pays car ils sont moins chers et plus faciles à fabriquer artisanalement.

Leur conception est en effet plus simple (cf. figure 4.9). Ils sont constitués d'une cuve cylindrique au fond de laquelle tournent des couteaux. Le fond de la cuve est constitué d'une grille perforée au travers de laquelle les plastiques suffisamment broyés peuvent passer par gravité. La transmission du couple du moteur aux couteaux se fait en dessous de la grille.

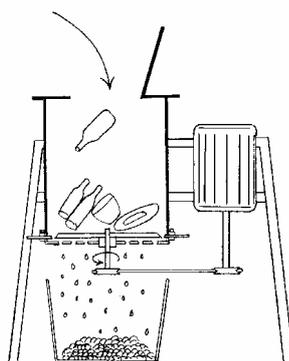


Figure 4.9 : Principe du broyeur à axe vertical

L'alimentation du broyeur en déchets plastiques se fait par le haut. Afin de se protéger des particules projetées vers le haut, le broyeur est équipé d'un système de goulotte (cf. broyeur à axe horizontal) ou de clapet.

Les couteaux sont d'habitude au nombre de 2 et placés diamétralement opposés. Ils doivent être régulièrement affûtés pour assurer un bon rendement de broyage. A puissance de moteur égale, la capacité de broyage des broyeurs à axe vertical est plus faible que celle des broyeurs à axe horizontal.

L'accès à la grille est plus difficile que pour les broyeurs à axe horizontal. Il est nécessaire de démonter les couteaux pour la changer. Le nettoyage du broyeur est également une opération moins aisée.



Photo 4.15 : Broyeur à axe vertical
(Yaoundé, 2003)

c. Agglomérateur ¹¹

Les films plastiques broyés sont trop volumineux et légers que pour pouvoir être introduits tels quels dans des extrudeuses ou des presses d'injection. Leur alimentation est trop difficile et les vis ont du mal à les entraîner dans les machines. Une étape supplémentaire de préparation est nécessaire afin de les convertir en flocons plus denses et mieux manipulables. Ceci est réalisé à l'aide d'un agglomérateur. La conception de cette machine est fort semblable à celle des broyeurs à axe vertical, si ce n'est qu'elle ne comporte pas de grille dans sa partie inférieure. Les films plastiques broyés restent un certain temps dans la zone de broyage. Le cisaillement important qu'ils subissent les chauffe jusqu'à leur température de ramollissement. Le volume de matière diminue alors rapidement (augmentation de la densité). A ce moment, de l'eau froide est introduite dans l'appareil, ce qui provoque un brusque refroidissement de la matière et la rend cassante. Le plastique est alors récupéré sous forme de petits granulés de forme irrégulière, mais de densité suffisante que pour être ensuite introduits dans des machines de transformation.

La force motrice nécessaire pour échauffer le plastique est élevée (minimum 15 kW, triphasé). De plus, elle doit subir des variations d'effort importantes. Environ cinq minutes sont nécessaires pour ramollir les films plastiques. La capacité de production varie entre 40 et 70 kg par heure. Les granulés obtenus peuvent être criblés sur une grille afin d'être calibrés. Les particules trop fines sont réintroduites dans l'agglomérateur.

L'introduction d'eau produit beaucoup de vapeur qui doit être évacuée par un système de ventilation. Les changements de température et la présence de vapeur favorisent la corrosion. Un traitement anti-rouille doit être régulièrement appliqué à toutes les parties vitales de l'appareil.

Les agglomérateurs sont des machines assez dangereuses et relativement coûteuses qui nécessitent une étude de rentabilité avant d'en envisager l'achat (quantité de films plastiques suffisante, débouchés, ...). Des machines de fabrication locales sont courantes dans certains pays (Inde, Egypte, Turquie, Mexique, ...).

¹¹ En anglais : « crumber ».



Photo 4.16 : Vue intérieure d'un agglomérateur

Outil	Puissance	Débit	Avantages	Inconvénients
Couteaux	-	15 à 25 kg par heure et par personne	Possibilité de pré-découpage en amont. Matériel bon marché.	Capacité de découpage faible. Travail éprouvant. Limité aux déchets peu épais.
Ciseaux fixes	-	50 kg par heure et par personne	Possibilité de pré-découpage en amont. Bras de levier permettant le découpage de sections plus épaisses. Matériel robuste.	Capacité de découpage limitée. Travail éprouvant.
Scies sauteuses ou rotatives	< 5 kW	40 à 80 kg/h	Système motorisé, travail beaucoup plus soutenable. Production améliorée.	Matériel non conçu pour la découpe de plastiques (parfois mal adapté et peu robuste).
Cisaille rotative	> 7 kW	> 100 kg/h	Système robuste à grande capacité de production. Découpage en petits fragments, même pour les objets arrondis.	Pas de possibilité de pré-découpage en amont. Investissements importants. Matériel souvent importé.
Broyeur à axe horizontal	> 5 kW	> 50 kg/h	Matériel robuste et de grande capacité. Nettoyage et entretien rapide.	Matériel coûteux et souvent importé à grand frais.
Broyeur à axes vertical	> 5 kW	> 30 kg/h	Meilleur marché et plus facile à fabriquer que les broyeurs à axe horizontal.	Peu robuste. Changement de grille et nettoyage plus difficile. Capacité plus faible.
Agglomérateur	> 10 kW	40 – 70 kg/h	Appareil spécifique aux films plastiques.	Appareil coûteux et consommateur d'électricité.

Tableau 4.4 : Récapitulatif des techniques de découpage et de broyage

L'achat d'un broyeur :

L'achat d'un broyeur est une étape importante et délicate pour laquelle il faut prendre en compte les considérations suivantes :

1. La première donnée importante à déterminer est la puissance requise. Comme indiqué précédemment, celle-ci est déterminée à partir du débit de matière à traiter, avec un strict minimum de 5 kW. Il est conseillé de toujours surdimensionner le broyeur, et ceci pour deux raisons : limiter l'échauffement et se donner la possibilité d'augmenter la production. Le broyage étant une étape antérieure à la transformation, le broyeur doit être capable de toujours satisfaire les outils de transformation.
2. La taille maximale des déchets plastiques entrant dans le broyeur est une seconde donnée importante. Elle détermine la taille minimale de la zone d'alimentation. Si aucun appareil ne permet l'introduction de tels morceaux de plastiques, une étape de pré-découpage est indispensable.

3. Quelles sont les disponibilités en terme d'électricité ? Ces données seront capitales pour les fabricants ou les fournisseurs de matériel : fréquence, voltage, nombre de phases, ...
4. Le mode de fonctionnement peut également avoir son importance. Pour une utilisation sans arrêts (flux régulier de plastiques de même sorte), un broyeur puissant est nécessaire pour éviter les échauffements. Pour une utilisation par campagne (petits flux de plastiques différents, avec nettoyage du broyeur entre chaque campagne), un plus petit broyeur peut suffire. Il se refroidira lors du nettoyage.

D'autres questions pourront être posées :

- Quelles sont les facilités de nettoyage et de changement de grille ?
- Quelle est la fréquence des entretiens ? La durée de vie des couteaux ?
- L'appareil respecte-t-il les règles élémentaires de sécurité ?
- Quelles sont les conditions de paiement et de transport du matériel ? Quelle garantie est proposée sur l'achat de l'appareil ? Existe-t-il un service après-vente dans le pays ?
- L'appareil est-il fixe ou monté sur roulette ?

Il existe 3 marchés potentiels pour l'achat d'un broyeur :

1. La plupart des machines industrielles sont fabriquées en Europe et en Amérique du Nord. Un marché de machines d'occasion est également bien implanté dans ces pays, mais leur coût est souvent élevé. La plupart des fournisseurs possèdent des sites internet bien conçus. Pour chaque appareil, les informations données sont généralement les suivantes : le type de machine, la marque, la puissance, le type d'alimentation électrique possible, la largeur et le diamètre du rotor, le nombre de couteaux fixes et mobiles, la dimension de la zone d'alimentation, la dimension totale de la machine, le poids, ... Ces fiches techniques sont souvent accompagnées de photographies permettant de visualiser la machine. Le prix est soit indiqué, soit envoyé par courrier électronique sur simple demande. Avant d'envisager l'achat, il faut toujours s'informer des conditions de paiement et de transport (assurance, frais d'importation, taxes) ainsi que de la garantie. En effet, un certain nombre de coûts peuvent faire augmenter le prix de la machine de 50 à 60 % !
2. Une alternative meilleure marché que celle décrite ci-dessus est le marché indien ou chinois. Le recyclage des déchets plastiques est en effet bien implanté dans ces pays, au point qu'il existe des ateliers qui fabriquent des machines spécifiques à cette activité. Les broyeurs sont généralement des duplications simplifiées de machines importées. La différence de prix est due aux coûts de fabrication moins élevés, à une finition moins poussée et au dépouillement de toute pièce de sécurité ou de réduction des nuisances sonores. Elle se fait néanmoins au détriment de la robustesse et de toute condition d'après vente. Des pays tels que la Turquie, le Mexique et l'Egypte possèdent également de tels marchés.
3. La troisième possibilité est de faire fabriquer son broyeur par un atelier de mécanique local. Dans ce cas, mieux vaut s'adresser à des ateliers ayant l'expérience de ce genre de fabrication et de bien suivre le montage afin de s'assurer de la robustesse de la machine. Le broyeur le plus simple à fabriquer est le broyeur à axe vertical. D'autres machines, inspirées des traditionnels broyeurs à manioc peuvent satisfaire de petites productions à condition de surdimensionner

toutes les pièces : le broyage du plastique est en effet beaucoup plus difficile que celui du manioc ! Les couteaux devront être solidement attachés au rotor.

Les avantages des broyeurs fabriqués localement sont le coût, les possibilités d'adaptation à des applications particulières ainsi que l'absence de problèmes d'importation. Ces machines sont toutefois moins efficaces (frais d'électricité plus importants), moins robustes (entretiens fréquents, durée de vie faible) et moins sûres (parfois dangereuses).

Lors de l'achat du broyeur, il vaut mieux directement se procurer 1 ou 2 jeux de couteaux, des courroies de rechange, un jeu de grille d'ouvertures différentes, ...

Chapitre 5

La mise en forme des plastiques

1. Quelles sont les techniques accessibles ?

Une fois triés, lavés, séchés et broyés, les déchets plastiques peuvent être remis en forme afin d'obtenir de nouveaux objets. Pour cela, différentes techniques de transformation sont possibles. Chacune d'elles nécessitent l'emploi de matériel plus ou moins sophistiqué, décrits ci-après.

Les flocons de plastiques peuvent être introduits directement dans ces machines. Néanmoins, lorsqu'ils proviennent de gisements hétérogènes de déchets, ils peuvent donner des objets de qualité variable. Il est parfois préférable de procéder à une étape de préparation supplémentaire appelée la granulation. Cette technique permet de fondre les flocons et de les transformer en petits granulés de taille homogène. On peut en profiter pour leur ajouter différents additifs afin de leur donner des propriétés intéressantes : couleur, souplesse, résistance aux agressions de l'air ou du soleil, ...

Dans certain cas, ces granulés sont revendus à des entreprises de transformation qui seront intéressées de substituer une partie de leur résine vierge par des produits recyclés (et donc moins cher). D'autres ateliers de recyclage préfèrent se doter eux-mêmes de machines de transformation afin d'obtenir des produits finis, écoulables sur les marchés locaux. La figure 5.1 illustre les options possibles pour la transformation des plastiques. L'extrusion et le moulage par injection sont abordés plus en détail dans ce chapitre.

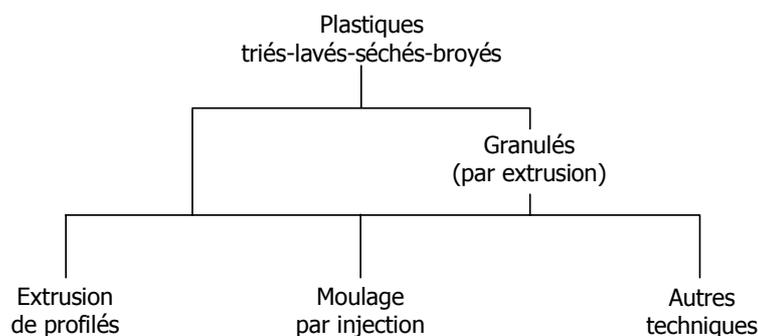


Figure 5.1 : techniques de transformations accessibles pour le recyclage des déchets plastiques

2. La granulation

Les fragments de plastiques broyés peuvent être utilisés tels quels dans des ateliers de transformation afin d'obtenir des produits finis commercialisables. Cependant, malgré le tri et le lavage, ils peuvent encore présenter de gros problèmes d'hétérogénéité pour les raisons suivantes :

- la séparation par sortes de plastiques n'est jamais parfaite, des erreurs humaines arrivent souvent ;
- bien que triés par couleurs, les teintes des plastiques ne sont jamais tout à fait les mêmes ;
- le broyage génère des flocons de tailles et de formes très variables qui peuvent être difficiles à manipuler et à introduire à l'alimentation des différentes machines de transformation ;
- la densité en vrac de ces flocons est souvent faible (~200 kg/m³) et leur transport sur de longues distances peut être coûteux ;
- au sein d'une même catégorie de plastiques, différents additifs peuvent être utilisés en différentes proportions ;
- la dégradation chimique (vieillesse, oxydations, altération par le soleil, ...) des objets collectés peut être variable et les flocons peuvent être plus ou moins dégradés.

La granulation est un ultime procédé de préparation qui permet d'homogénéiser les matières et de leur donner la forme de granulés de taille uniforme plus facilement commercialisables. Elle consiste à fondre et à mélanger les plastiques broyés dans une extrudeuse et à les transformer en filaments. Une fois refroidis, les filaments sont découpés en petits morceaux cylindriques de même taille (typiquement 3-4 mm), appelés « granulés ».

A ce stade, il importe de faire une petite remarque de vocabulaire. On appelle :

- Flocons : les fragments de plastiques obtenus après broyage ;
- Granulés : les fragments de plastiques obtenus après granulation¹².

Outre l'homogénéisation et la mise en forme de granulés de taille uniforme, la granulation rend possible :

- la filtration des impuretés encore contenues dans les déchets plastiques ;
- l'ajout et l'homogénéisation de différents additifs tels que des pigments, des plastifiants, des charges, ...
- la densification des produits en vrac ;
- le mélange et l'homogénéisation de différents plastiques pour obtenir des granulés d'une qualité requise par le valorisateur (exemple : mélange de PVC rigide et plastifié pour obtenir un PVC de souplesse voulue) ;
- le mélange éventuel avec de la résine vierge.

C'est pourquoi la granulation est également appelée « régénération ». La valeur marchande des granulés obtenus est largement supérieure à celle des plastiques simplement broyés (cf. chapitre 6).

¹² En anglais, « granulé » se traduit par « pellet », flocons par « flakes », mais aussi « chips » ou « dices ». Les unités de granulation sont appelées « pelletizer ». Le terme « granulator » existe aussi, mais il est parfois utilisé pour caractériser les broyeurs à couteaux. Il faut donc bien visualiser l'appareil avant d'envisager un investissement.

La granulation offre beaucoup de souplesse. Les granulés peuvent avoir différentes qualités selon les débouchés envisagés. Néanmoins elle représente une étape de préparation supplémentaire et nécessite des investissements conséquents qui ne sont pas toujours justifiés.

Une unité de granulation se compose de trois parties distinctes (cf. figure 5.2) :

- une extrudeuse ;
- un système de refroidissement ;
- un outil de découpe.

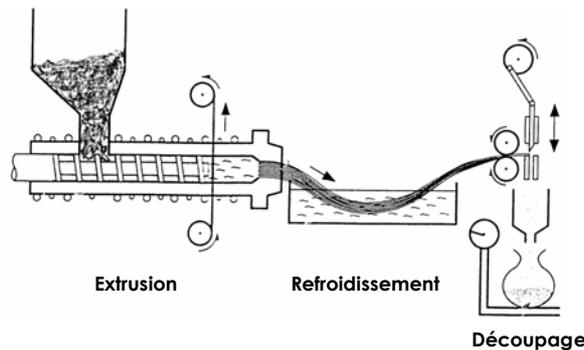


Figure 5.2 : principe de la granulation

L'extrudeuse

L'extrusion est un procédé qui génère des profilés en continu. L'extrudeuse est un cylindre muni d'une vis d'Archimède qui combine les fonctions de convoyage, compaction, mélange (homogénéisation) et fusion des matières plastiques. En bout de course, la pâte de plastique est extrudée (passage forcé sous pression) au travers d'une filière qui lui confère la (les) section(s) désirée(s). Pour la granulation, la filière de l'extrudeuse est constituée d'orifices circulaires calibrés permettant d'obtenir des « spaghetti » de diamètre désiré.

Voici, en détail, les principaux composants d'une extrudeuse :

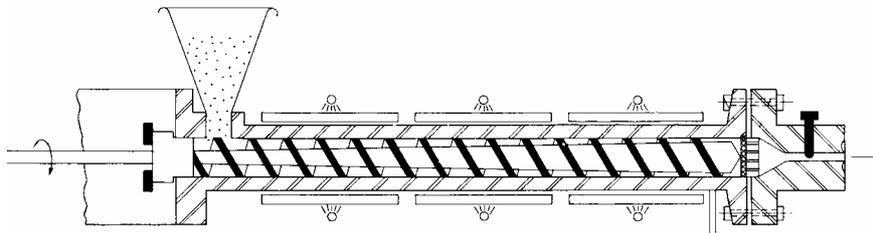


Figure 5.3 : principaux constituants de l'extrudeuse

a. Le cylindre

La vis d'Archimède de l'extrudeuse tourne dans un cylindre massif en acier, parfois appelé « fourreau ». Celui-ci est muni d'un système de résistance permettant de le chauffer lorsque la friction interne des flocons ne permet pas d'atteindre des

températures assez élevée que pour les fondre. Il peut également être muni d'un système de refroidissement lorsqu'au contraire, la température obtenue peut occasionner des dégradations chimiques des polymères.

Le cylindre est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques considérables. C'est pourquoi il est fabriqué en acier de haute qualité permettant une bonne résistance à l'abrasion et à la corrosion.

Le diamètre intérieur du cylindre détermine la capacité de l'extrudeuse, exprimée en kilos de plastique extrudé par heure. Les diamètres standards sont :

Diamètre (pouces)	Diamètre (mm)
1 ½	38
2	51
2 ½	64
3 ¼	83
3 ½	89
4 ½	115
6	153
8	204

Tableau 5.1 : diamètres standards des extrudeuses

Dans la mesure du possible, on préférera sélectionner une extrudeuse ayant le plus grand diamètre possible. Elle offrira une plus grande flexibilité d'opération et permettra de travailler avec une grande gamme de résines.

La longueur du fourreau est également une caractéristique importante. On l'exprime généralement par le rapport Longueur/Diamètre (L/D). Les premières extrudeuses étaient relativement courtes, avec un L/D de l'ordre de 12. A présent, les extrudeuses sont plus longues : L/D = 18 à 24, voire 30. Une longueur importante améliore l'homogénéisation et stabilise les débits. Le plastique peut par contre se dégrader chimiquement suite à une exposition trop longue à des températures importante. Pour le recyclage, on préférera donc une longueur limitée afin d'éviter des dégradations trop importantes des polymères.

b. La vis

La vis d'Archimède a plusieurs fonctions pour l'extrusion :

- elle transporte la matière de l'alimentation jusqu'à la filière (convoyage) ;
- elle plastifie la matière grâce au malaxage qui homogénéise la répartition de la chaleur contenue dans le cylindre ;
- elle augmente progressivement la pression qui densifie d'abord la matière et lui confère ensuite la force nécessaire pour traverser la filière.

La vis d'une extrudeuse est une pièce savamment conçue et fabriquée avec beaucoup de soins. Elle est réalisée en acier de très haute qualité (acier chromé, aciers spéciaux), usinés avec précision et ayant subi des traitements thermiques et de surfaces. Elle ne peut ni se fabriquer ni se réparer artisanalement. Il n'y a pas d'autre alternative que de l'acheter chez des fabricants ou des fournisseurs.

La géométrie de la vis est étudiée afin d'obtenir les meilleures conditions d'extrusion. Il existe ainsi une grande variété de formes.

La vis la plus simple a un pas constant, mais une profondeur de gorge variable : le diamètre intérieur de la vis augmente depuis l'entrée (alimentation) vers la sortie, afin de compenser la compaction (élimination des vides). Le « rapport de compression » (rapport de volume entrée-sortie) est souvent compris entre 3 et 4.

Il existe également des vis à pas variable ou à double hélice. D'autres possèdent une zone postérieure contenant des chicanes ou des torpilles qui cassent le boudin continu de la vis et améliorent donc le mélange. Certaines vis sont composées de deux zones d'homogénéisation séparée par une « zone de détente » qui permet d'évacuer les gaz éventuels.

Enfin, les extrudeuses récentes peuvent posséder des doubles vis dont les pas s'engrènent parallèlement et qui tournent dans le même sens ou inversement. Ce système améliore sensiblement la fonction de mélange/homogénéisation.

Le comportement des matières plastiques dans l'extrudeuse peut être divisé en trois zones :

1. la zone d'alimentation¹³ :

Les flocons de plastiques sont introduits dans la zone d'alimentation de l'extrudeuse par une ouverture via une trémie. Cette première zone assure un premier compactage des flocons.

2. la zone de transition :

Au fur et à mesure de leur compactage, les flocons de plastiques subissent des frottements intenses qui, cumulés à un apport de chaleur par des résistances électriques enroulées autour du cylindre, les fondent progressivement. Les frottements internes (friction des flocons et viscosité élevée du plastique fondu) engendre beaucoup de « chaleur de mélange » dans l'extrudeuse, si bien que parfois, il n'est pas nécessaire de chauffer le fourreau. On parle alors de fonctionnement adiabatique. Parfois, il est même nécessaire de refroidir le fourreau.

Selon leur type et les conditions opératoires (vitesse de rotation de la vis, géométrie de la vis, température du fourreau, ...), le plastique fond plus ou moins vite. La partie de la vis dans laquelle ce ramollissement se crée est appelée la « zone de transition ». La longueur de celle-ci peut être très variable : 2-3 tours de vis, ou au contraire 1/3 à 2/3 de la longueur totale.

3. la zone de pompage¹⁴ :

La dernière portion de la vis sert à homogénéiser le plastique fondu et à le mettre sous pression pour vaincre la contre-pression (perte de charge) de la filière. Cette zone, appelée « zone de pompage », contrôle et stabilise le débit de l'extrudeuse. Une zone de pompage longue et étroite favorise l'homogénéisation et la stabilité des débits. Elle augmente par contre les risques de dégradation chimique par frottements internes, c'est pourquoi les extrudeuses de recyclage de déchets plastiques ont préférablement une zone de pompage profonde caractérisée par un rapport de compression modéré (inférieur à 3).

Le contrôle et la régulation des températures le long de l'extrudeuse et dans la filière sont très importants. En effet, la viscosité et la pression du plastique, et donc le débit, varient sensiblement avec la température. Le contrôle des températures est généralement réalisé à l'aide d'un thermocouple.

¹³ En anglais : « feed zone ».

¹⁴ En anglais : « metering », « melting » ou « pumping zone ».

Le tableau suivant reprend les gammes de température classiques de fonctionnement pour les différentes zones de l'extrudeuse :

Type de plastique	T° Zone d'alimentation	T° Zone de transition	T° Zone de pompage	T° Filière
PEHD	140	160	165	170
PEBD	125	125	130	135
PP	185	200	220	240
PVC rigide	155	165	180	180
PVC souple	175	165	155	160

Tableau 5.2 : températures de fonctionnement des extrudeuses pour différents polymères

Ces températures sont valables pour les résines vierges. Pour le recyclage, on préfère travailler à plus basse température et à vitesse de rotation plus lente pour éviter les dégradations. Cette remarque est d'autant plus valable pour le PVC qui, en se dégradant, génère de l'acide chlorhydrique (HCl). Outre les risques d'inhalation et autres, l'acide risque de corroder la vis et le fourreau de l'extrudeuse.

La vitesse de rotation de la vis d'une extrudeuse est généralement comprise entre 150 et 300 tours/minutes. Sur la plupart des machines, cette vitesse est réglable.

Il est difficile de prédire le débit des extrudeuses. Ceci est dû au fait que les caractéristiques d'écoulement des plastiques dépendent de manière complexe (non linéaire) des frottements et de la température. De manière générale, on peut considérer que les trois facteurs qui influencent principalement le débit d'une extrudeuse en régime sont la température, la vitesse de rotation de la vis et le diamètre intérieur du fourreau.

Certaines règles empiriques existent. Ainsi, indépendamment de la vitesse de rotation de la vis, de la température et du type de résine, on peut trouver dans la littérature la formule suivante :

$$Q = 7 \times d^{2,2}$$

avec,

Q (kg/heure) : débit horaire de l'extrudeuse ;
 d (pouces) : diamètre intérieure du fourreau de l'extrudeuse.

Ainsi, une extrudeuse ayant un diamètre intérieur de 3 ½ pouces aurait un débit de 110 kg/heure.

Une autre règle empirique plus simple propose une relation entre le débit de l'extrudeuse et la puissance moteur de sa vis :

$$Q = 2 \text{ à } 4 \times P$$

avec,

Q (kg/heure) : débit horaire de l'extrudeuse ;
 P (kW) : puissance moteur de la vis.

Avant d'envisager un investissement, on se fera confirmer ces débits par le fournisseur de la machine.

c. Le filtre

Malgré le lavage, les déchets plastiques peuvent encore contenir des impuretés (papiers, métaux, ...). Ces impuretés peuvent être extraites du plastique fondu en faisant passer celui-ci au travers d'un filtre situé dans la zone de pompage de l'extrudeuse. Une fois colmaté, le filtre peut être changé, nettoyé et réutilisé.

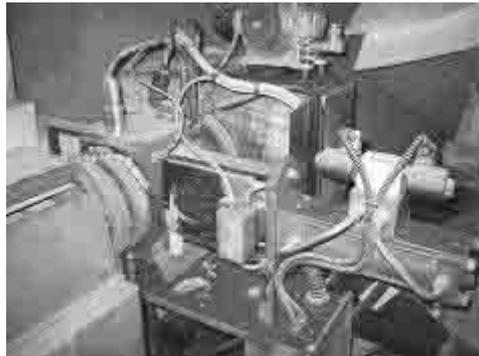


Photo 5.1 : filtre d'une extrudeuse de régénération

Pour une utilisation normale, le filtre se colmate rapidement et doit être changé au moins toutes les minutes. Cette opération est généralement réalisée manuellement.

d. La filière

La filière utilisée pour la régénération des déchets plastiques est une plaque métallique perforée par des trous circulaires calibrés au travers desquels le plastique fondu est poussé. Il en résulte des filaments de plastiques fondus d'un diamètre de 2-3 mm qui seront refroidis et découpés.



Photo 5.2 : filière d'un extrudeuse de régénération

Le système de refroidissement

Afin d'être refroidis, les filaments de plastiques (parfois appelés « joncs ») sont directement plongés dans un bac d'eau. Ils sont tirés dans le bac par le granulateur (cf. paragraphe suivant) et sont maintenus immergés par des peignes qui les alignent afin d'éviter tout contact entre eux (cf. figure 5.3). La longueur du bac doit être

suffisante grande que pour refroidir efficacement les plastiques. Elle est proportionnelle au diamètre des filaments et à la vitesse de ceux-ci.



Photo 5.3 : extrusion et refroidissement de filaments

Une purge de l'eau chaude doit être réalisée en permanence afin de la remplacer par de l'eau froide. Cette eau pourra être recyclée en l'utilisant par exemple pour le lavage des déchets plastiques.

Le granulateur

Le granulateur est composé d'une roue munie de dents coupantes, actionnée par un petit moteur électrique (1 à 10 kW). Il joue un double rôle. D'une part, il tire les filaments, leurs permettant ainsi de rentrer et sortir du bain de refroidissement. D'autre part, les dents découpent les filaments refroidis en petits granulés de 3-4 mm de longueur.



Photo 5.4 : granulateur

La capacité du granulateur doit être assez élevée que pour suivre la cadence de l'extrudeuse. La vitesse d'alimentation doit être réglée en fonction de la vitesse de sortie des filaments hors de la filière de l'extrudeuse. Cette vitesse est en général comprise entre 10 et 100 m/min.

Une fois découpés, les granulés sont recueillis à la sortie du granulateur et sont directement mis en sacs afin d'éviter toute contamination.



Photo 5.5 : récupération des granulés à la sortie d'un granulateur.

Remarque :

Un autre système possible est le découpage à chaud des filaments, directement à la sortie de la filière. Les granulés chauds tombent dans un bac d'eau pour être refroidis.



Photo 5.6 : découpage direct des filaments en sortie de filière

La goulotte qui les conduit vers le bac de refroidissement doit également être refroidie pour éviter que les granulés ne collent sur les parois. Ceci peut se faire au moyen d'un petit gicleur. L'eau emporte alors les granulés vers le bac.

Fonctionnement d'une installation de granulation :

Les extrudeuses de régénération sont des machines délicates à faire fonctionner. Il faut au moins compter un mécanicien expérimenté, ayant déjà travaillé avec de telles machines, pour 2-3 installations. De plus, deux personnes moins qualifiées sont nécessaires par installation pour l'alimentation de l'extrudeuse et pour la récupération des granulés de plastiques régénérés.

Un local couvert et bien aéré peut accueillir ce type de ligne de recyclage. Les extrudeuses sont des machines relativement lourdes qui doivent être installées sur une dalle de béton pour des questions de stabilité.

Vu les puissances installées, il est nécessaire d'avoir à sa disposition un bon réseau électrique. Les extrudeuses ne peuvent pas supporter de coupures de courant auquel cas elles se refroidissent et le plastique qu'elle contient se fige à l'intérieur. Dans le cas d'une implantation du centre dans une région soumise à des coupures fréquentes, il est indispensable de se doter d'un groupe électrogène. Ce groupe sera inévitablement de grande taille et peut constituer un investissement très important.

Outre ces considérations techniques, le coût énergétique de ces machines est non-négligeable et doit être bien évalué avant l'investissement. En Inde, les principaux problèmes rencontrés dans les entreprises de transformation sont dus à des problèmes électriques (instabilité du courant, coupures fréquentes, prix trop élevés, taxes supplémentaires, ...)

Les extrudeuses peuvent être purgées pour différentes raisons : arrêt de production de la machine, entretien, changement du polymère recyclé, ... La purge peut se limiter à arrêter l'alimentation de l'extrudeuse et à laisser tourner la machine jusqu'à qu'elle ne débite plus de matière. La vis n'est alors pas complètement vide. Elle contient encore une trentaine de pourcents de plastiques. Au redémarrage, ces matières contamineront le début de la production de l'extrudeuse et un certain laps de temps sera nécessaire avant que celle-ci ne débite de bons produits. Les résidus obtenus lors de la purge (filaments cassés, blocs de purges, ...) pourront être découpés, broyés et recyclés à nouveau.

Ajout d'additifs :

L'étape de granulation permet l'ajout d'additifs tels que des charges, des plastifiants, des stabilisants ou des anti-oxydants. Afin d'obtenir des couleurs plus éclatantes et homogènes, il est également possible d'ajouter des pigments ou des colorants. Les pigments sont généralement des oxydes ou des sels métalliques. Ils peuvent s'acheter en poudre, mais pour des questions de manipulation, il est toujours préférable de les acheter sous forme de granulés. On en ajoute généralement 1 à 3 % selon la qualité requise.

En Inde, les transformateurs ajoutent à ces pigments ce qu'ils appellent des « masterbatches ». Il s'agit de capsules contenant plusieurs additifs tels que le dioxyde de silicium pour l'homogénéité et la manutention, des agents dispersants (éthers, des cires) et d'autres agents tels que les sels de silice ou de titane. Ces « masterbatches » améliorent l'homogénéisation de la couleur et n'ont pas d'impacts sur le procédé.

3. L'extrusion

Outre la granulation décrite précédemment, les extrudeuses peuvent être utilisées pour une multitude d'applications décrites ci-après.

L'extrusion de profilés

La fabrication de profilés est réalisée en utilisant des extrudeuses du même type que celles décrites pour la granulation. Seules les filières placées sur la tête de l'extrudeuse diffèrent. Ainsi, selon la géométrie de la filière, il sera possible de produire des plaques, des feuilles, des tubes, des joncs, des tuyaux, des gaines ainsi qu'une multitude d'autres profilés ayant des sections de formes très complexes : châssis de fenêtre, glissières, ...

L'extrudeuse peut être alimentée par des granulés de plastiques régénérés ou directement par des flocons, selon la qualité souhaitée. A la sortie de la filière, les profilés doivent être refroidis dans des bains de refroidissement, avant d'être débités aux dimensions souhaitées.

Les profilés obtenus peuvent être utilisés tels quels (tuyaux d'arrosage, tuyaux d'égouttage, plaques, ...) ou être assemblés (châssis de fenêtre, matériel sanitaire, ...).

La figure 5.7 illustre la fabrication artisanale de balayettes. Celles-ci sont réalisées à l'aide de filaments extrudés et découpés à une quarantaine de centimètres. Ils sont ensuite rassemblés et liés ensemble au bout d'un bois servant de manche.



Photo 5.7 : fabrication de balayette à l'aide de filaments de plastiques extrudés

Extrusion-soufflage : *Corps creux*

L'extrusion-soufflage permet d'obtenir des objets creux : flacons, bouteilles, fûts, jouets, pièces industrielles, ... Ceci se réalise en deux phases :

1. On extrude en continu un tube que l'on découpe en tronçons de longueur souhaitée appelés « paraisons ».
2. Ces paraisons sont amenées encore chaudes à l'intérieur d'un moule. Le moule est refermé ce qui provoque une soudure par pinçage d'une des extrémités de la paraison. Un tuyau de soufflage est introduit dans l'autre extrémité. On souffle alors de l'air sous quelques kilos de pression afin de plaquer les parois de la paraison sur les parois intérieures du moule. Après un temps de refroidissement, le moule s'ouvre et le corps ainsi formé est éjecté. La machine est alors prête pour un nouveau cycle.

L'ensemble de cette transformation est automatique, l'extrusion étant continue et le soufflage discontinu. Cette technique n'est quasiment pas possible à mettre en œuvre artisanalement. Du matériel spécialisé et un personnel qualifié sont nécessaires.

Extrusion-calandrage : *Feuilles, plaques*

L'extrusion-calandrage est une technique qui permet d'obtenir des plaques ou des feuilles de plastiques. Elle consiste à extruder un profilé plat et à l'étirer au travers de calendres successives jusqu'à l'obtention d'un produit d'épaisseur souhaitée.

La nomenclature des produits obtenus dépend de leur épaisseur. On parlera de

- plaques, lorsque l'épaisseur est supérieure à 1,5 mm ;
- feuilles, lorsque l'épaisseur est comprise entre 200 µm et 1,5 mm ;
- films, lorsque l'épaisseur est inférieure à 200 µm.

L'extrusion-calandrage de films exige de l'équipement de précision ce qui rend cette technique très coûteuse. Elle a été remplacée par l'extrusion-gonflage.

Extrusion-gonflage : Films

La technique de l'extrusions-gonflage permet d'obtenir des films très fins (jusqu'à 10 µm d'épaisseur) qui servent notamment à la fabrication des sachets. Elle s'applique à la plupart des matières plastiques (PEHD, PEBD, PP, ...).

Cette technique consiste à extruder une mince gaine qui est gonflée à chaud par de l'air (cf. figure 5.4). Le film, en forme de bulle, est ensuite aplati par un dispositif composé de panneaux convergeant vers des rouleaux pinceurs. Le film aplati passe alors dans des rouleaux-fireurs avant d'être enroulé sur des bobines réceptrices.

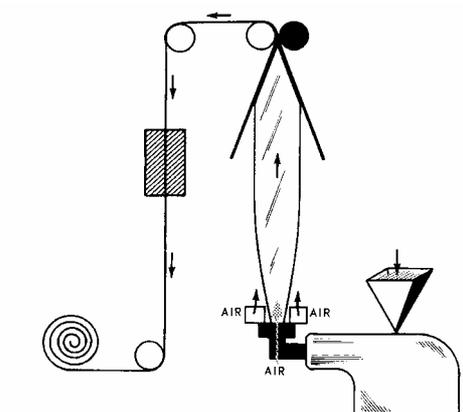


Figure 5.4 : principe de l'extrusion-gonflage

L'air qui remplit la gaine est introduit par l'axe de la filière annulaire utilisée pour cette production. Celle-ci a une géométrie en équerre. Un système de refroidissement intérieur et extérieur placé au niveau de la gaine déjà gonflée permet d'arrêter l'étirage. Ce phénomène est provoqué par la solidification de la matière plastique refroidie qui supporte alors les contraintes provenant du gonflage.

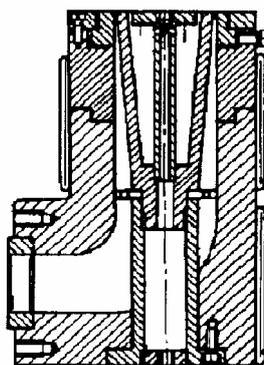


Figure 5.5 : tête d'équerre pour gaine soufflée

Les rouleaux obtenus pourront ensuite être découpés selon les formes voulues pour obtenir des sachets, des sacs, des bâches, ...

La fabrication de films plastiques est une technique qui n'est pas facilement réalisable de manière artisanale. De plus, elle nécessite des résines de bonne qualité. L'utilisation de granulés issus de déchets n'est donc pas évidente. Elle a néanmoins déjà été reproduite. Au Caire, un chiffonnier est arrivé à reproduire une machine après s'être fait engager quelques mois dans une entreprise de fabrication de sac.



Photo 5.8 : extrusion gonflage pour la fabrication de sacs (Caire, 1994)

Le ballon de plastique fabriqué est plié et enroulé en rouleaux d'une cinquantaine de mètres. Il est ensuite déroulé, découpé et soudé afin d'obtenir des petits sacs. Des poignées peuvent être également découpées. Ce type de sachets est plutôt vendu dans des entreprises d'outillages. On évite les magasins agro-alimentaires étant donné que les granulés utilisés sont issus du recyclage de déchets.



Photo 5.9 : enroulage des sacs après soufflage (Caire, 1994)

Cette activité occupe 3 personnes à plein temps. L'espace nécessaire est un local bien aéré de 30 m². Les moteurs et le plastique fondu dégagent en effet beaucoup de chaleur et d'odeurs.

4. Le moulage par injection

Généralités

Le moulage par injection est un procédé de transformation qui permet d'obtenir des pièces en plastique de différentes formes. Comme pour l'extrusion, il consiste à chauffer les flocons ou les granulés de plastique afin de les fluidifier (plastification). La pâte de plastique est ensuite introduite sous pression dans un moule pour donner la forme souhaitée. Il s'agit donc d'un procédé discontinu : une fois le moule refroidi, la pièce est extraite du moule et l'opération peut recommencer.

Le moulage par injection est réalisé à l'aide de presses à injecter. Celles-ci se composent de trois parties (cf. figure 5.6) :

- un pot d'injection dans lequel la matière est plastifiée. La matière plastique est introduite via une trémie d'alimentation et est progressivement chauffée au contact des parois du pot. Un piston assure le transfert de la matière fluidifiée vers le moule via une buse.
- un moule dans lequel le plastique à l'état pâteux est introduit. Il épouse la forme des parois dessinées en négatif pour obtenir l'objet désiré. Une fois le moule refroidi (grâce à un système de refroidissement éventuel), la pièce peut être extraite. Le moule est prêt pour un nouveau cycle d'injection.
- un système de fermeture nécessaire pour verrouiller le moule lors de l'injection et permettant l'ouverture pour le démoulage.

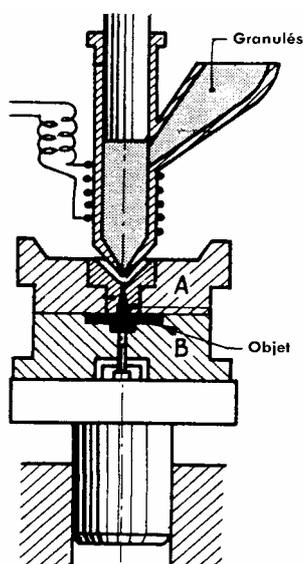


Figure 5.6 : presse d'injection à piston

Dans les anciennes versions, la plastification (fluidification par chauffage) ne se fait qu'à partir des gaines chauffantes qui entourent le pot d'injection. Les machines récentes disposent de vis qui répartissent la matière et l'homogénéise. Une description détaillée des anciens modèles est toutefois intéressante car ces machines ont une conception simple, reproductible par des ateliers mécaniques locaux. L'expérience montre que des ateliers artisanaux de transformation utilisant ce type de machine arrivent à produire à bas coûts des pièces à valeur ajoutée importante.

Presse d'injection à piston

Les presses d'injection à piston ont la même conception que la presse illustrée à la figure 5.6. Les matières plastiques (flocons ou granulés) sont introduites par gravité au sommet du pot d'injection. Celui-ci peut avoir une capacité d'injection qui atteint 60 à 70 grammes. Le piston est déplacé soit manuellement (via un levier ou une manivelle), soit par un système hydraulique. Un système de résistances chauffantes enroulées du pot d'injection assure le chauffage. Il est recouvert d'une gaine isolante.



Photo 5.10 : pot d'injection d'une presse à piston (Cuernavaca, 1999)

De même que pour l'extrusion, chaque type de plastique doit être chauffé à la bonne température pour qu'il puisse être injecté. Le tableau 5.3 reprend les gammes de température requises :

	T° ramollissement	T° fusion	T° transformation	T° dégradation
PEHD	125-135	130	260-310	200-240
PVC	150-200		170-190	175-200 !
PEBD	102-112	110-120	160-260	
PP	160-165	168-169	250-270	
PS	70-115		180-230	250-350

Tableau 5.3 : températures de fonctionnement des extrudeuses pour différents polymères

Le contrôle de la température est un des points les plus délicats. Il nécessite une bonne maîtrise des opérateurs. Deux moyens de régulation de la température sont possibles :

1. Un thermostat peut être directement relié à l'alimentation électrique de la machine. Celui-ci coupe l'arrivée de courant lorsque le pot d'injection est à la température voulue. Pour cela, un thermostat couvrant des températures de 0 à 300 °C est indispensable. L'inconvénient de cette méthode est que ce type de thermostat est coûteux et fragile.
2. Un autre système est de concevoir un circuit électrique permettant de faire varier l'alimentation de la résistance chauffante. L'opérateur peut ainsi contrôler la température sur base de la fluidité du plastique en sortie de buse. Cette méthode est moins coûteuse mais requière une certaine expérience de la part de l'opérateur.

Les résistances chauffantes sont soumises à de longues durées de travail et peuvent s'endommager. Un rebobinage régulier est alors nécessaire (au moins tous les 6 mois).

L'extrémité du pot d'injection est munie d'une buse dont le canal de sortie vient s'appuyer sur l'entrée du canal d'injection percé dans le moule. Pour améliorer l'homogénéisation de la matière avant d'arriver à la buse, certaines machines sont équipées de torpilles. Ces pièces divisent le flux pour mieux le mélanger et le chauffer.

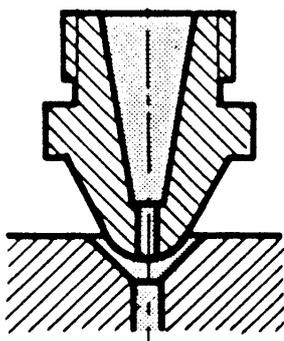


Figure 5.7 : buse d'injection

Remarque importante :

Ne jamais laisser du plastique plus de trois minutes dans le pot d'injection sans l'injecter. Il risque de se dégrader, de devenir extrêmement fluide et de dégouliner par gravité en provoquant des dégâts (brûlures, bavures, ...).

Les moules sont des pièces importantes et délicates. Ils peuvent être caractérisés par leur nombre d'empreintes, leur architecture, leur système d'alimentation et leur mode de régulation de température.

1. Les « empreintes » sont les cavités qui représentent l'objet. Un seul moule peut contenir plusieurs empreintes. Elles sont alors remplies de matière via des canaux.
2. L'architecture d'un moule désigne la manière dont le moule est monté : moules à deux plaques, à trois plaques, ... ainsi que son système de fermeture et de verrouillage.
3. Le système d'alimentation est l'ensemble des canaux qui guident les plastiques fondus dans les empreintes. Ils peuvent être très complexes. Ils doivent être étudiés pour faciliter l'écoulement du plastique fluidifié dans les empreintes.

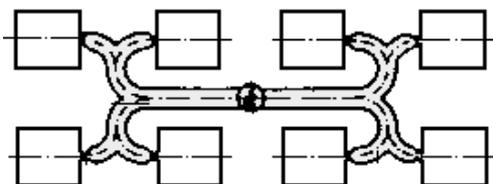


Figure 5.8 : canaux d'alimentation d'un moule à 8 empreintes

4. Un moule doit toujours être froid pour que l'objet durcisse avant d'être démoulé. Les matières plastiques fluidifiées apportent périodiquement des calories, il faut

donc les refroidir constamment. Ceci se fait via la circulation d'un fluide qui régule la température.



Photo 5.11 : moule à 10 empreintes et son système de refroidissement hydraulique

Des canaux extrêmement fins permettent l'évacuation des gaz lors du remplissage sans que le plastique ne puisse passer. Ils peuvent être obtenus par des petits coups de meulage. Certains moules peuvent disposer d'un système d'éjection qui permet de démouler la pièce rapidement.

Les moules sont fabriqués en acier travaillé ou parfois en Zamac. Ceux en acier coûtent souvent plus chers, mais ils sont plus précis et leur durée de vie est nettement plus longue. Les moules en Zamac seront plutôt choisis lorsque la quantité de pièces à produire ne justifie pas un moule en acier (commandes, marché limité, ...).

Pratique du moulage par injection :

L'injection est un procédé discontinu. Chaque cycle comprend les étapes suivantes :

1. la fermeture du moule ;
2. l'injection de la matière plastique fluidifiée dans le moule, après sa mise en contact avec la buse ;
3. le refroidissement du moule, couplé avec le retrait du piston et le remplissage du pot d'injection avec de la matière plastique (flocons ou granulés) ;
4. le démoulage après retrait du piston pour décaler la buse du moule.

Un nouveau cycle peut alors commencer.

La quantité de matière injectée correspond à peu près au tiers de la capacité maximum d'injection déterminée par la course du piston.

Sur base du temps nécessaire pour effectuer un cycle complet et du poids des objets produits par cycle, il est possible de déterminer la capacité d'une machine pour un moule donné. Ainsi, à Cuernavaca (Mexique), une personne travaillant sur une presse à piston est capable de réaliser un cycle toutes les 40 secondes. Les objets produits sont des chevilles pour vis. Le moule (à trois plaques) possède 10 empreintes. La production horaire est d'environ 1000 chevilles soit 2-3 kg e plastique par jour.

Le local dans lequel les presses sont installées nécessite une bonne ventilation car ces machines dégagent beaucoup de chaleur. Chaque presse doit être fixée sur un établi solide (métallique de préférence), ancré au sol et parfaitement horizontal. Un pied permet d'ajuster la presse à la hauteur requise par le moule pour assurer le contact entre la buse d'injection et le moule.



Photo 5.12 : injection de chevilles
(Cuernavaca, 1999)

Un gros avantage des petites presses d'injection à piston est qu'elles peuvent travailler avec du courant monophasé. Toutefois, lorsque plusieurs machines travaillent dans le même atelier, il faut veiller à bien vérifier la capacité du raccordement. De plus, il est préférable de raccorder chaque machine à un disjoncteur spécifique afin d'éviter des variations importantes de la chaleur apportée par les résistances. La qualité des pièces injectées peut en dépendre.

Fournisseur de presses d'injection à piston :

Vulcano Inyectoros S.A.

Dr Ruiz 14
Mexico 7 D.F.
Tél. : 578.72.65
578.74.18
Fax. : 674.34.19

Fournisseur mexicain de presse à piston.

Prix pour une machine d'occasion (avril 2001) : ~ 1000 €

Prix pour un système hydraulique de fermeture (avril 2001) : 3.500 €

Ce type de presse ne se trouve plus sur les marchés européens et nord-américains. On en trouve par contre sur les marchés indiens, turques et égyptiens.



Photo 13 : moulage par injection de cintres (Caire, 1994)¹⁵

Presse d'injection à vis

Les plastiques étant mauvais conducteurs de chaleur, leur plastification peut être difficile et non-homogène (les parois étant plus chaudes que l'intérieur du pot). Pour y remédier, la plupart des nouvelles machines utilisent une vis mobile en translation. Pendant la plastification, la vis est mue en rotation et recule dans le pot. La matière fluidifiée s'accumule dans la tête du pot. Une fois que la quantité de plastique nécessaire est accumulée, la vis est poussée par un vérin qui la transforme en piston pour remplir le moule.

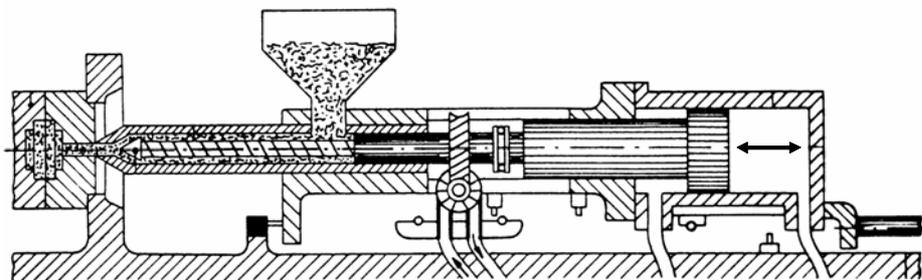


Figure 5.9 : presse d'injection à vis

Outre un meilleur transfert de chaleur dans le pot, la vis homogénéise beaucoup mieux la matière. Cet avantage est important lorsqu'on travaille avec des matières récupérées. Il en va de même lorsque l'on ajoute différents additifs tels que les pigments, charges, ... De plus, les objets qu'il est possible de produire peuvent être largement plus importants : bassins, chaises, bacs, ...

Cependant le prix d'une telle machine est beaucoup plus élevé que celui d'une presse à piston. L'investissement est rarement justifié pour l'injection de petites pièces à faible valeur ajoutée.

¹⁵ Les presses à injection peuvent être verticales ou horizontales.

Chapitre 6

Considérations économiques

Dans beaucoup de pays en développement, le recyclage des déchets plastiques est une activité économiquement rentable. La main d'œuvre souvent bon marché permet de limiter les coûts de traitement et ainsi de concurrencer le prix des résines vierges généralement coûteuses, car importées. De plus, dans ces pays, la demande de produits fabriqués en plastique ne cesse d'augmenter, ce qui offre un gisement de déchets important et des possibilités de débouchés pour les matières recyclées.

Néanmoins, la viabilité économique de tout projet de recyclage dépend de nombreux facteurs qui, s'ils ne sont pas suffisamment maîtrisés, peuvent compromettre l'activité. Ainsi, on ne soulignera jamais assez l'importance des débouchés. Ceux-ci doivent être analysés dès la phase d'évaluation d'un projet. Ils sont en effet la seule rentrée d'argent d'un centre de recyclage. La conquête de marchés et leurs pérennités sont donc capitales.

Les paragraphes suivants détaillent quelques aspects économiques à considérer pour veiller à la viabilité économique d'un centre.

1. Les coûts du recyclage

Les coûts relatifs au recyclage des déchets plastiques peuvent être répartis en trois catégories : l'achat des déchets plastiques, les frais d'investissement et les coûts de production.

Achat des plastiques

Le prix d'achat des déchets plastiques dépend de leur type et de leur qualité. Lorsque le centre engage lui-même des agents de collecte, ceux-ci pourront normalement se procurer gratuitement les déchets industriels, commerciaux et agricoles. Au contraire, les déchets municipaux apportés par la population et ceux provenant des centres de tri ou triés en décharge doivent être achetés au poids. Leur prix se situe en général entre 5 et 15 % du prix des résines vierges.

Leur qualité est toutefois variable, c'est pourquoi il est souvent nécessaire d'établir des listes de prix selon certains critères. Ainsi, en Inde, il existe deux grandes catégories, à savoir les déchets collectés à la source (peu souillés) et les déchets triés dans les décharges (souillés). Leurs prix varient énormément : 3 % du prix des résines vierges pour les premiers contre 16 % pour les seconds.

Ces différences de prix sont évidemment liées aux coûts de traitement (lavage) que la souillure engendre, mais aussi au fait que la saleté est payée au prix du plastique alors qu'elle devra être éliminée !

Cette division peut être étendue en un nombre plus large de catégories dont les prix peuvent être clairement affichés. Les agents de collecte et les réceptionnistes du centre ont un rôle capital qui consiste à bien évaluer la qualité des plastiques apportés. De plus, ils doivent comptabiliser la quantité de déchets achetés par catégories et reporter les poids dans un cahier de compte.

Il va de soit qu'il ne faut pas acheter les plastiques que le centre n'est pas capable de recycler. Un minimum de vigilance est indispensable lors de l'achat car outre le fait qu'ils auront été payés pour rien, ces déchets encombreront inutilement le centre.

L'achat des déchets plastiques nécessite de liquidité. L'expérience montre que certains artisans travaillant dans le recyclage (trieurs, laveurs, ...) ont vu leur activité limitée faute d'argent liquide nécessaire pour l'approvisionnement en déchets plastiques. Une étude menée en Inde a montré que 25 % des faillites d'entreprises de recyclage des plastiques était dues à des problèmes de liquidité.

Frais d'investissement

Les frais d'investissement comprennent principalement l'achat (ou la location) d'un terrain, de bâtiments et de matériels. Ces coûts sont fixes quelle que soit la quantité de plastiques recyclés.

Le terrain doit pouvoir accueillir un stock important de déchets. De plus, les activités de triage, lavage et séchage sont généralement exercées à l'extérieur (parfois sous un préau).

Les bâtiments doivent avoir une taille suffisante que pour abriter les machines et l'un ou l'autre bureau.

Si les prix des terrains et de l'immobilier sont faciles à connaître, le montant des investissements en machines est moins évident à évaluer (cf. chapitre 4 et 5). Les machines telles que les extrudeuses et les presses d'injection ne survivent généralement pas beaucoup plus longtemps que 5 à 7 ans, tellement elles sont sollicitées (souvent deux postes de 8 h. avec peu de maintenance et d'entretien). Il est donc nécessaire de prévoir des provisions pour leur renouvellement.

Coûts de traitement

Par coûts de traitement, on entend les frais inhérents à la production, à savoir : la main d'œuvre, les consommables (eau, électricité, détergents, additifs, ...), et le transport. Ceux-ci varient avec la quantité de plastiques recyclés par le centre de recyclage. Pour la plupart des centres existants, celle-ci se situe entre 200 et 600 kg/jour.

Les principaux frais de traitement sont les coûts de la main d'œuvre. Le recyclage des plastiques est en effet une activité nécessitant un capital humain important.

A cela, il faut ajouter le personnel qui assure la comptabilité, la réception des déchets, la gestion globale du centre et la vente des produits transformés. Connaissant le prix de la main d'œuvre locale, il est donc possible d'évaluer préalablement les frais en personnel nécessaires pour le bon fonctionnement du centre, puis de les ajuster en cours de réalisation.

Pour rappel, les capacités de production d'une personne pour les différentes phases du traitement sont données au *tableau 6.1*.

Opérations	Production journalière par personne	Remarques
Collecte	10 – 50 kg	Selon le type de système de collecte mis en place.
Tri	80 -150 kg	Selon l'expérience des trieurs.
Lavage - séchage	50 – 100 kg	Selon le degré de souillure et le type de lavage.
Broyage	300 - 2000 kg	Selon la capacité de la machine utilisée (1 à 2 personne(s) par machine, dont une qualifiée)
Régénération	20 kg - >	Selon la capacité de la machine utilisée (2 personnes par machine, dont une qualifiée)
Transformation	2 kg - >	Selon la capacité de la machine utilisée (1 personne formée par machine)

Tableau 6.1 : Capital humain nécessaire pour le recyclage des déchets plastiques

Les coûts de transport prennent également une place importante dans les frais de traitement. Les différentes remarques données au chapitre 3 valent la peine d'être considérées attentivement : moyens de transport adaptés, localisation du centre, sites de transfert, réduction de taille des déchets pour obtenir des densités en vrac plus importantes, ...

Les frais en consommables peuvent être chiffrés à partir d'une rapide enquête sur les différents prix pratiqués localement. Pour certains produits utilisés en grande quantité tels que les détergents, la soude, et éventuellement les pigments et autres additifs chimiques, il peut être intéressant de faire des recherches sur la possibilité de les importer en grande quantité. Les tarifs sont parfois très avantageux.

Pour les différents appareils mécaniques, il ne faut pas oublier de considérer des heures et des frais de maintenance.

Au total, il n'est pas évident de chiffrer à l'avance les frais de production tellement ceux-ci varient en fonction des conditions locales. De plus, les centres de recyclage se donnent rarement la peine de les évaluer et peu de données sont accessibles. Néanmoins, le tableau suivant donne la répartition des coûts de traitement pour trois centres de recyclage :

Types	Répartition des coûts de traitement		
	Istanbul Source : Waste	Cameroun Source : CIPRE	Kinshasa * Source : ISF
Main d'œuvre	31 %	68 %	32 %
Transport	22 %	12 %	5 %
Consommables	18 %	12 %	21 %
Locaux	7 %	-	10 %
Investissements	9 %	-	28 %
Autres	13 %	8 %	5 %

* Projet en phase d'évaluation

Tableau 6.2 : Répartition des coûts de traitement

La forte variation au niveau des frais d'investissement est due au fait que seul le projet de Kinshasa inclus une filière complète de recyclage (jusqu'à la régénération) alors que les deux autres se limitent au broyage.

2. Les débouchés

Les débouchés sont capitaux dans les projets de recyclage des déchets plastiques. En effet, ils représentent les seules rentrées d'argent au bout du processus de traitement.

Inventaire des débouchés possibles

Chaque étape de traitement donne une plus-value aux produits, et selon les cas, une possibilité d'écoulement sur le marché.

a. Le réemploi

Le réemploi est peut-être une des manières les plus nobles pour recycler les déchets. Il consiste à donner une seconde vie au produit après une éventuelle étape de remise en état. Ceci peut se faire pour toute une gamme de produits.

A Yaoundé, par exemple, 30 % des sandales collectées sont pour la plupart lavées et renouvelées pour être ensuite vendues au tiers du prix des sandales neuves.

b. Les plastiques triés – lavés – séchés

Dans le pays où le recyclage des déchets plastiques est bien introduit (Egypte, Inde, Turquie, ...), le triage, le lavage et le séchage sont réalisés par des petites entreprises qui n'ont que cette activité. Les lots de plastiques ainsi constitués sont vendus à d'autres entreprises spécialisées dans le broyage, la régénération et/ou la transformation.

c. Les flocons

Le découpage et le broyage des plastiques en flocons donnent une valeur marchande qui devient intéressante lorsqu'il existe des grandes usines de transformation dans les environs du centre. En effet, celles-ci disposent généralement d'extrudeuses de régénération pour recycler leurs propres déchets de production.



Photo 6.1 : Flocons de plastiques destinés à une entreprise de transformation

Elles sont souvent intéressées d'y introduire une partie de flocons des déchets triés et lavés (5 à 20 %) afin de diminuer les coûts de fabrication. D'autres produisent des objets entièrement à base de plastiques recyclés pour des marchés de moindre qualité.

Un inventaire complet des entreprises travaillant à proximité du centre doit donc être effectué lors de la phase d'évaluation du projet.

d. Les granulés

Le marché de granulés est assez similaire à celui des flocons, si ce n'est que les prix demandés peuvent être plus élevés. En effet, les transformateurs ne devront les granuler eux-mêmes avant de les utiliser.

L'étape de granulation offre en plus la possibilité de fournir des produits de caractéristiques requises par les entreprises de transformation. Ainsi, en Inde, les « pellets » sont produits à la demande des utilisateurs selon un cahier des charges fournis. Ces pellets ont les propriétés requises : couleurs, propriétés physiques (agents plastifiants, antioxydants, stabilisants, ...), charges, qualité (mélange avec de la résine vierge), ...

e. Les produits transformés

A priori, tous les produits fabriqués à partir de résines vierges peuvent être réalisés avec des matières recyclées. Néanmoins, certains débouchés doivent être évités : objets médicaux, emballages pour aliments, objets susceptibles d'être mis en bouche, ...

Il n'est pas possible de dresser un inventaire exhaustif de tous les débouchés. La liste suivante peut toutefois donner des idées :

Plastiques	Objets
HDPE/LDPE	Bouteilles, jouets, pots de fleurs, cônes de circulation, paniers, récipients, objets ménagers, tuyaux agricoles, sacs, feuilles, chevilles pour vis, peignes, tuyaux, tampons, cintres, montures de lunettes, joints, ...
PP	Objets ménagers, suitcases, bobines de fils, outillage, ...
PVC	Tubes électriques, tuyaux de drainage et d'irrigation, bouteilles, câbles, tuyaux rigides, semelles, sandales, ...
PS	Jouets, talon de chaussures, caches de phares, équipements électriques, ...

Tableau 6.3 : Liste non-exhaustive de débouchés potentiels

Les objets fabriqués avec des petites presses d'injection à piston (cf. chapitre 5) sont généralement limités à une cinquantaine de grammes.



Figure 6.2 : Semelles de chaussures (Egypte)

Au niveau économique, la réalisation de produits finis doit être envisagée avec beaucoup de précaution. De mauvais choix peuvent avoir des conséquences désastreuses. Les moules et les filières sont très coûteux. Il est nécessaire de s'assurer qu'il existe bien un marché suffisant pour écouler les produits qu'ils peuvent fabriquer.



Figure 6.3 : Tampons, talons de chaussures, rouleaux d'encres fabriqués à l'aide de petites presses à piston (Egypte)

Vente des plastiques recyclés

Le prix de vente des plastiques recyclés dépend directement du prix des résines vierges sur le marché local. Celui-ci est directement lié aux cours des résines sur le marché mondial (lui-même dépendant du cours du pétrole). Le tableau suivant reprend l'évolution des prix des différents polymères :

Année	Prix des polymères (€/kg)			
	PE	PP	PS	PVC
1997	0,77	-	0,77	0,66
1998	0,84	-	0,84	0,75
1999	0,61	0,54	0,66	0,53
2000	0,97	0,80	0,92	0,82
2001	0,96	0,89	1,15	0,78
2002	0,65	0,69	0,75	0,56
2003	0,90	0,85	1,20	0,81

Tableau 6.4 : Evolution des prix des résines vierges

A cela, il faut ajouter les frais d'importation : transport, dédouanement, taxes, ... Dans certains pays, les prix se retrouvent majorés de 20 à 50 %. De plus, les délais de livraison sont souvent importants ce qui peut encourager les transformateurs à acheter du plastique régénéré. Avant de s'adresser à eux, il est donc toujours intéressant de connaître le prix du marché local des résines afin de pouvoir négocier correctement les prix.

L'expérience montre que les prix qui peuvent être revendiqués à chaque étape de traitement se situent dans les ordres de grandeur suivants :

Caractéristiques	Prix*	Remarques
Plastiques collectés	5 - 15 %	Selon le type, la qualité, le degré de souillure, ...
Plastiques triés	10 - 25 %	Selon les fractions et leur qualité.
Plastiques lavés - séchés	25 - 50 %	Selon leur propretés (type de lavage).
Plastiques découpés	25 - 50 %	N'apporte pas de valeur ajoutée importante, mais permet de diminuer les coûts de traitement.
Flocons	40 - 65 %	Selon le type de plastiques, leur couleur et leur propreté.
Granulés	55 - 80 %	Selon la qualité et les additifs ajoutés (pigments, plastifiants, charges, ...)
Objets recyclés	> 100 %	Ceux-ci peuvent atteindre des prix très importants (concurrence avec le marché des objets en résine vierge).

* Exprimés en pourcentage de la valeur des résines vierges.

Tableau 6.5 : Valeurs de plastiques aux différentes étapes de recyclage

Ces prix peuvent varier sensiblement d'une situation locale à l'autre. Le tableau suivant donne les prix de vente pour quelques villes de référence :

Caractéristiques	Prix* Kinshasa (RD Congo)	Prix* Istanbul (Turquie)	Prix* Yaoundé (Cameroun)	Prix* Bangalore (Inde)	Prix* Nouakchott (Mauritanie)
Plastiques collectés	5 %	11,6 %	4 - 16 %	3 - 16 %	-
Plastiques triés	11 %	18,6 %	-	-	-
Plastiques lavés	29 - 33 %	46,5 %	16 - 33 %	26 - 37 %	-
Flocons	37 - 49 %	62,8 %	-	-	-
Granulés	58 - 67%	74,4 %	-	74 - 80 %	70 %

* Exprimés en pourcentage de la valeur des résines vierges.

Tableau 6.6 : Variation des valeurs des plastiques pour différents pays

Ces données permettent de situer le recyclage des déchets plastiques dans un contexte économique. Tout initiateur de projet devra estimer les coûts et les possibilités d'écoulement pour sa propre situation afin d'évaluer la viabilité de son activité.

Chapitre 7

Environnement et sécurité

1. Problèmes environnementaux

Problèmes d'hygiène liés aux déchets

La collecte, le traitement et le recyclage des déchets plastiques impliquent un contact direct des déchets par les différents acteurs de la chaîne du recyclage. Hors, les déchets peuvent véhiculer des maladies et leur manipulation peut contaminer les travailleurs.

Les micro-organismes qui sont la cause de désagréments tels que la diarrhée et la dysenterie trouvent dans les déchets tous les éléments pour se développer et se propager. Leur présence dans les immondices est généralement due à la matière fécale contenue dans certains déchets municipaux. De plus, les déchets attirent les rats qui véhiculent bon nombre de maladies comme le typhus. Enfin, les mouches, les moustiques et autres insectes sont attirés par les résidus organiques. Ils sont également responsables de la transmission de pathologies.

Pour toutes ces raisons, et bien que peu d'entreprise de recyclage ne travaillent de la sorte, il est vivement conseillé de laver les déchets plastiques avant de les trier. La qualité du tri sera grandement améliorée tout en préservant les trieurs du contact avec les agents pathogènes.

Produits chimiques

Les différents acteurs du recyclage des matières plastiques travaillent en présence de divers produits chimiques parfois mal connus et négligés.

1. Les matières plastiques peuvent être considérées comme des matières inertes ne présentant pas de toxicité. La lumière, la chaleur ou les transformations mécaniques peuvent par contre les dégrader et notamment les décomposer en leur monomère respectif. Le styrène (monomère du PS) et le chlorure de vinyle (monomère du PVC) sont très toxiques, mais l'éthylène (monomère du PE) et le propylène (monomère du PP) peuvent également poser des problèmes.
2. Bon nombre de pigments et de colorants contiennent des métaux lourds qui donnent la pigmentation : cadmium (Cd), chrome (Cr), plomb (Pb), cobalt (Co), sélénium (Se), cuivre (Cu), étain (Sn), ... dont certains sont très toxiques pour l'être humain (notamment le Cd et le Pb).

Lorsque les pigments sont utilisés sous forme de poudre, il faut veiller à ne pas les inhaler. Il est dès lors préférable de les acheter en capsule prévue à cet effet (en anglais : « masterbatch »).

3. D'autres additifs tels que les plastifiants (phtalates), les retardateurs de flammes (à base d'agents bromés) et les stabilisateurs (pouvant contenir du baryum, de l'étain, du cadmium ou du plomb) causent également des nuisances pour la santé et l'environnement.
4. La soude ou la potasse caustique, régulièrement ajoutées dans les bains de lavage, doivent être manipulées avec les précautions décrites au *chapitre 4*.

Pollution de l'air

Les problèmes de qualité de l'air se retrouvent à différentes phases du processus de recyclage :

1. Le broyage provoque beaucoup de poussières qui peuvent provoquer des gênes respiratoires chez les opérateurs. Les effets de l'inhalation de fines particules se constatent sur le long terme, après des années d'exposition. Seules les très fines particules sont dangereuses, les autres sont normalement captées par le système respiratoire et ne peuvent affecter les poumons. Pour y remédier, il faut veiller à travailler avec des masques.
2. Les machines de transformation peuvent dégager des matières volatiles. Ceci peut se faire dans deux conditions :
 - à température normale : dégradation dans les conditions normales de travail due à la présence de contaminants, de pigments, d'additifs, ...
 - à haute température : dégradation des polymères lorsque les températures de travail sont trop importantes (dégagement d'hydrocarbures, NOx, SO₂, CO, CO₂ et gaz chlorés dans le cas du PVC).

Le monoxyde de carbone (CO) est plus facilement fixé par les globules rouges que l'oxygène (O₂). Son inhalation en trop grande quantité provoque des maux de tête, des états de fatigue, des étourdissements voire des nausées, des vomissements et des évanouissements.

Les NOx provoquent des irritations au nez et aux yeux. A plus forte concentration dans l'air, leurs impacts pour les poumons peuvent être irréversibles.

Les hydrocarbures provoquent également des irritations aux poumons, mais certains sont également connus pour leurs effets carcinogènes.

Les dégagements d'acide chlorhydrique (HCl) dus à la dégradation du PVC peuvent sérieusement affecter le système respiratoire de l'être humain. Ce phénomène est d'autant plus préoccupant que le PVC non plastifié est composé à 58 % de chlore. Lorsqu'il est plastifié, cette valeur tombe aux environs de 50 %. La transformation du PVC s'opère généralement entre 150 °C et 210 °C, mais on peut constater des dégradations à partir de 180 °C. On comprend pourquoi il est fortement déconseillé de recycler ce plastique lorsque l'on ne dispose pas du matériel adéquat, à savoir : une extrudeuse permettant le dégazage, un bon système de contrôle de la température, un local correctement ventilé, ... L'emploi d'agent stabilisant est parfois nécessaire.

3. Lorsque les filtres en bout d'extrudeuse sont colmatés, ils sont généralement nettoyés en brûlant les résidus contenus par le plateau perforé dans une flamme. Les fumées qui s'en dégagent contiennent également des matières volatiles qu'il faut éviter de respirer (hydrocarbures si PP, PE ; HCl si PVC, ...).

De manière générale, on limitera les nuisances dues à la mauvaise qualité de l'air en travaillant dans des locaux bien ventilés selon les bonnes conditions opératoires.

Nuisances sonores

Parmi toutes les activités du processus de recyclage, celle du broyage est la plus bruyante. Elle peut atteindre 95 dB et ainsi dépasser les seuils de nuisances pouvant affecter irréversiblement l'ouïe. L'emploi de casques ou de bouchons pour protéger les oreilles est donc indispensable.

2. Sécurité de travail

Quelques considérations générales relatives aux conditions de travail doivent être prise en compte :

1. Toujours travailler avec des vêtements et des accessoires de protection tels que :
 - des gants, imperméables pour le lavage. En effet, dans certains pays, les laveurs travaillent 6 à 8 heures avec les mains dans des solutions de soude à pH élevé.
 - des lunettes de sécurité (broyage) ;
 - un bleu de travail ;
 - des bouchons ou un casque pour oreilles pour le broyage ;
 - un masque anti-poussière (broyage et tri) ;
 - ...
2. Effectuer des pauses régulières pour les travaux fatigants tels que le lavage, le triage, le découpage, ...
3. Travailler dans des locaux correctement ventilés. En effet, outre les problèmes liés à la qualité de l'air, les machines de recyclage dégagent beaucoup de chaleur. Huit heures de travail dans la chaleur d'une extrudeuse peuvent provoquer des fatigues et ralentir le système d'immunité du travailleur. Leur norme américaine préconise une ventilation de 1,3 m³/min par kilowatts installés dans local.

Il importe également de souligner quelques problèmes fréquemment rencontrés :

- Les irritations de la peau et les coupures lors du lavage et du séchage sont fréquentes, c'est pourquoi l'utilisation de gants solides imperméables est indispensable. Le nettoyage des broyeurs est également une opération délicate. Il faut toujours bien s'assurer d'avoir débrancher l'appareil avant de le nettoyer.
- Les courts-circuits sont fréquents, surtout si le matériel est bricolé. Toujours mettre des caches de protection sur les zones de raccords et les placer dans des coffrets.
- Les techniciens peuvent se brûler au contact des fourreaux des extrudeuses si ceux-ci ne sont pas protégés. Il en va de même avec toute pièce chaude des machines de transformation, voire au simple contact du plastique sortant des filières.
- Une humidité importante dans les flocons de plastique entrant dans une extrudeuse peut provoquer un dégazage si important qu'il peut conduire à des explosions.

3. Qualité des produits issus du recyclage

Les articles fabriqués à partir de matières plastiques recyclées ont des qualités inférieures à ceux fabriqués avec des résines vierges. Certains défauts peuvent poser problème aux consommateurs. C'est le cas des pigments ou autres additifs mal mélangés dans le plastique, des dégradations locales de la résine ou de la présence d'éléments indésirables présents dans les déchets. De plus, les produits extrudés présentent parfois une certaine porosité qui peut héberger des bactéries.

Il est difficile de pouvoir estimer l'impact réel que peuvent avoir ces défauts sur le consommateur. Ils sont toutefois directement liés à la qualité du travail réalisé par les recycleurs. La meilleure façon de les limiter est donc de respecter des règles de travail et d'effectuer un contrôle de qualité des produits. Il est également déconseillé d'utiliser du plastique recyclé pour fabriquer des objets susceptibles d'être mis en contact avec des aliments (emballages, flacons, sachets de commission, ...) ou avec la bouche (couverts en plastiques, assiettes, gobelets, ...).

Annexe I : Illustrations

Asmae

Chapitre 4, photos 8 et 14
Chapitre 5, photos 5, 7, 8, 9 et 13
Chapitre 6, photos 2 et 3

Asmae est une ASBL qui, depuis 1981, réalise et/ou organise des camps-chantiers et d'animation, des projets en partenariat avec des associations et communautés locales, et sensibilise les jeunes aux échanges Nord-Sud, Sud-Nord et Sud-Sud.

L'ASBL Asmae a partagé sa banque de donnée qui répertorie l'ensemble des techniques de recyclage élaborées par plusieurs pays en développement dans tous les domaines (plastique, métal, tissus, papier, verre...). Les chiffonniers du Mokattam (Le Caire - Egypte) ont accepté de partager avec l'ASBL Asmae leur formidable créativité en matière de recyclage. Alors qu'il y a 20 ans, les chiffonniers n'étaient que des récupérateurs de déchets, ils sont devenus petit à petit les meilleurs recycleurs de la planète. C'est par le système essai/erreur qu'ils sont parvenus à mettre au point d'intéressantes techniques de recyclage.

Asmae ASBL
Av. de Woluwe-St-Lambert, 14
1200 Bruxelles
Email : info@asmae.org
<http://www.asmae.org>

Volens

Chapitre 4, photos 4, 5, 6, 7, 9 et 10
Chapitre 5, photos 10, 11 et 12

VOLENS est une ONG belge spécialisée dans l'envoi de coopérants, la réalisation de projets de développement et l'éducation au développement. Pour cela, VOLENS s'appuie sur 26 sections locales et une trentaine de groupes d'appui qui constituent la base de l'organisation de VOLENS et son ancrage local, au plus près de la population.

Ces sections et groupes d'appui effectuent, en collaboration avec le service éducation au développement, un travail d'information, de sensibilisation, d'éducation autour des projets en faveur du Sud qu'elles soutiennent, ainsi que des actions de récolte de fonds pour financer ces projets.

Avant sa fusion avec VOLENS, SOS/PG a monté diverses relations de partenariat à travers le Service Projets. C'est ainsi que SOS/PG a établi un partenariat avec l'organisation Mexicaine DIA-AC (Desarrollo Integral Autogestionario – Asociación Civil) qui a abouti à un projet cofinancé par la DGCD dans son programme quinquennal 1998-2002. Ce projet a consisté à la « Mise en place d'un modèle de base de petits ateliers populaires de recyclage de plastique pour une diffusion dans l'Etat de Morelos ». Toutes les photographies provenant de ce projet ont été prises par DIA-AC.

VOLENS ASBL
Secrétariat Bruxelles : rue de Molenbeek, 122 à 1020 Bruxelles
Tél 00 32 (0)2 201 02 70
Email : info@volens.be

Secrétariat Ans : rue de l'Yser, 258 à 4430 Ans
Tél 00 32 (0)4 247 75 75

CIPRE

Chapitre 2, photo 3

Chapitre 3, photos 2, 8, 9 et 12

Chapitre 4, photos 1, 3, 15 et 16

Chapitre 5, photo 3

Chapitre 6, photo 1

Le Centre International de Promotion de la REcupération (CIPRE) est une ONG camerounaise qui présente une vocation internationale dans la récupération des déchets urbains. La finalité principale de son existence est le développement à la fois économique et environnemental. Son objectif « Cité PROPRE » (PROPRE, comme Promotion du Recyclage des Ordures Plastiques et de la Récupération des Emballages) lui a permis de mettre en œuvre une filière de collecte et de recyclage de déchets plastiques dans la ville de Yaoundé. Ce projet a été soutenu par la Mission de Coopération et d'Action Culturelle (MCAC) par le Fonds Social de Développement (FSD). Une assistance technique a été assurée par le GRET (Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques, France). Actuellement, le CIPRE étend ses activités à la ville de Douala.

Les photos illustrant ce projet ont été prises par Sébastien Willerval, André Frisaye (fondation Frisaye) et George Van den Bossche (ISF)

CIPRE

B.P. 14180 Yaoundé, Cameroun

Email : ciprepropre@yahoo.fr

WASTE Consultants

Chapitre 3, photo 3

WASTE Consultants est une ONG néerlandaise impliquée dans les projets de développement pour les petites entreprises afin d'améliorer les conditions de vie dans les régions urbaines à bas revenus. WASTE Consultants est actif dans quatre domaines : la gestion des déchets solides et le recyclage, la gestion de l'eau et des besoins sanitaires, l'utilisation de la bicyclette comme moyen de transport urbain, l'amélioration de la vie en communauté.

WASTE Consultants

Nieuwehaven, 201

2801 CW Gauda, Pays-Bas

fax : + 31 182 550313

<http://www.waste.nl>

Annexe 2 : Références bibliographiques

Ali M., Cotton A. ; *The sweeping business : Developing entrepreneurial skills for the collection of solid waste* ; WEDC Loughborough University ; (United Kingdom) ; 2001.

Bareel P.F. ; *Rapport de mission Kinshasa 2003 : Evaluation d'un projet de recyclage de déchets plastiques* ; Ingénieurs Assistance Internationale – Ingénieurs sans Frontières ; Liège (Belgique) ; 2003.

Breyne P., Kellens M.A., Sorel N. ; *Les emballages plastiques* ; Ministère de la Région Wallonne ; Jambe (Belgique) ; 1995.

Christiaan Haan H., Coad A., Lardinois I. ; *Gestion des déchets municipaux : Engager des micro- et petites entreprises* ; Intermediate Technology Publications Ltd ; Londres (Royaume-Uni) ; 1999.

Compte-rendu : Journée de réflexion sur le recyclage des matières plastiques dans les projets de développement ; Ingénieurs Assistance Internationale – Ingénieurs sans Frontières ; Bruxelles (Belgique) ; 2002.

Des déchets et des hommes – Expériences urbaines de recyclage dans le tiers monde ; Enda Tiers-monde ; Dakar (Sénégal) ; 1990.

Dudez P. ; *Le séchage à petite échelle des fruits et légumes* ; Editions GRET ; Paris (France) ; 1996.

Dulac N. ; *Integrated Sustainable Waste Management –the Organic Waste Flow* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 2001.

Esha S. ; *Occupational health impact of plastic recycling* ; 23rd WEDC Conference, Water and sanitation for all : partnerships and innovations ; Durban (South Africa) ; 1997.

Guía para el manejo del reciclaje de los plásticos en micro-talleres ; Desarrollo Integral Autogestionario A.C. – Equipo Pueblo Morelos ; Cuernavaca (México) ; 1999.

Lardinois I., van de Klundert A. ; *Plastic Waste : options for small-scale resource recovery* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 1995.

Loozen R. ; *Fabrication de planches à partir de déchets plastiques* ; CODEART ; Hombourg (Belgique) ; 1998.

Modecom™ et les collectes séparatives : Compléments au guide méthodologique de caractérisation des ordures ménagères ; ADEME Editions ; Paris (France) ; 1997.

Modecom™ Méthode de caractérisation des ordures ménagères ; ADEME Editions ; Paris (France) ; 1993.

Muller M., Hoffman L. ; *Integrated Sustainable Waste Management – Community Partnerships* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 2001.

Rajaram V. ; *Plastic Reprocessing Pilot Project Bangalore : Needs assessment – Environmental, safety and occupational health dimension* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 1998.

Rajaram V., Esha S. ; *Plastic Recycling in Bangalore – India* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 1998.

Recycling plastics : technical brief ; Intermediate Technology Development Group ; Rugby (United Kingdom).

Rollet J., Fontaine E. ; *Travail des plastiques – Plasturgie* ; Librairie Delagrave ; Paris (France) ; 1970.

Scheinberg A. ; *Integrated Sustainable Waste Management – Financial Sustainable Waste Management* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 2001.

Scheinberg A. ; *Integrated Sustainable Waste Management – Micro and Small Enterprises* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 2001.

Tchuente R., Willerval S., de Boismenu I., Hennart C. ; *La valorisation des déchets plastiques de Yaoundé (Cameroun)* ; CIPRE ; Yaoundé (Cameroun).

Thuillier F. ; *Guide Technique d'Aide à la Décision pour la création d'unités artisanales de séchage agroalimentaire* ; Edition Geres ; Paris (France) ; 1999.

van de Klundert A., Anschütz J. ; *Integrated Sustainable Waste Management – the concept* ; WASTE Consultants ; Gouda (the Netherlands) ; 2001.

Van Hove I., Genard O. ; *Atelier Art-utic : Récupération et transformation artisanales des sachets de plastiques usagés* ; Enda Tiers-monde ; Dakar (Sénégal) ; 1996.

Vogler J. ; *Small-scale recycling of plastics* ; Intermediate Technology Publications ; London (UK) ; 1984.