

# SOMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION

## PARTIE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

*Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES RESSOURCES MINERALES DE MADAGASCAR*

*Chapitre 2 : GENERALITES SUR LES POLYMERES*

*Chapitre 3 : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES*

## PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES

*Chapitre 4 : ENQUÊTE AUPRES DE LA LAPIDAIRERIE D'ANTSIRABE*

*Chapitre 5 : INDETIFICATION DES MATIERES PREMIERES*

*Chapitre 6 : FORMULATION ET CARACTERISATION*

*Chapitre 7 : ETUDES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX*

CONCLUSION GENERALE

Bibliographies

Webographie

Annexe

Table des matières

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Polycondensation d'acide téréphthalate et d'éthylène glycol.....  | 7  |
| Figure 2 : cyclohexanediéthanol-1,4 (CHDM), Acide téréphthalique .....   | 7  |
| Figure 3 : Variation du module d'Young en traction en fonction de la température d'un film en PET  | 11 |
| Figure 4 : Comportement thermomécanique en traction d'un film en PET d'épaisseur 23 µm .....   | 12 |
| Figure 5 : Imprégnation de FIT .....   | 17 |
| Figure 6 : code d'identification du PET.....   | 28 |
| Figure 7 : Courbe granulométrique .....  | 33 |
| Figure 8 : Variation de la résistance à la compression du mélange de lapidairerie et le PET en fonction de la teneur en déchets minéraux ..... | 41 |

## **LISTE DES TABLEAUX**

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : Conditions de mise en œuvre des films de PET.....  | 8  |
| Tableau 2 : Propriétés principales des PET (résines ou films et feuilles) mesurées à 23°C et 50 % HR | 10 |
| Tableau 3 : Catégories de réglementations.....   | 14 |
| Tableau 4 : Echelle de Mohs sur la dureté et ténacité des gemmes.....                                | 23 |
| Tableau 5 : prix de produit lapidaire.....   | 27 |
| Tableau 6 : Caractéristiques de PET .....  | 29 |
| Tableau 7 : Résultat de l'analyse granulométrique.....   | 32 |
| Tableau 8 : Formulations proposées .....   | 35 |
| Tableau 9: Résultats des essais de compression en fonction de la teneur en déchets minéraux .....    | 40 |

## LISTE DES PHOTOS

|   |    |
|---|----|
| Photos 1 : atelier  | 24 |
| Photos 2 : Cie diamanté   | 24 |
| Photos 3 : Meule réglable ronde                                   | 25 |
| Photos 4 : Meule Fine   | 25 |
| Photos 5 : Papier Norton  | 26 |
| Photos 6 : Meule en tissus épais avec poudre diamantine           | 26 |
| Photos 7 : Caractéristique moteur                                 | 27 |
| Photos 8 : Déchiquetage   | 29 |
| Photos 9 : Echantillons des déchets                               | 30 |
| Photos 10 : Broyage des pierres                                   | 31 |
| Photos 11 : Tamis   | 32 |
| Photos 12 : Balance de précision                                  | 35 |
| Photos 13 : le mélange de lapidaillerie et du PET à presque 248°C | 36 |
| Photos 14 : moule et dame de compactage                           | 37 |
| Photos 15 : produit fini  | 38 |
| Photos 16 : Echantillon des produits dans un moule 50x50x50 mm    | 38 |
| Photos 17 : Appareil de compresseur                               | 39 |

## **LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS**

ABS : poly (styrène/butadiène/acrylonitrile)  
BHET : Bis hydroxy éthyle téraphthalate  
CEMP : Centre d'étude des matières plastiques  
CRM : Centre de recherche sur les macromolécules  
C: Carbone  
EP : Polyépoxydes  
GD : Grande Diffusion  
MC : Matériau composite  
O: Oxygène  
PAN : Polyacrylonitrile  
PA : Polyamide  
PBT : Polybutylène Téréphthalate  
PCTFE : polychlorotrifluoroéthylène  
PC : Polycarbonates  
PEEK : Polyétheréthercetone  
PEI : Polyétherimide  
PET : Polyéthylène Téréphthalate  
PF : Phénoplastes  
PI : Polyimides  
POM : Polyoxyméthylène  
PPO : Polyphénylène Oxyde  
PPS : Polysulfure de phénylène  
PP : Polypropylène  
PSU : Polysulfone  
  
PTFE : polytétrafluoroéthylène  
PUR : Polyuréthannes  
PVC : Polychlorure de vinyle  
SI : Silicones  
TD : Thermodurcissable  
T° : Température  
TP : Thermoplastique  
UP : Polyesters insaturés  
UV : Ultra-Violet

## INTRODUCTION

Actuellement, les plastiques et les composites à matrice organique ont permis beaucoup de prouesses techniques dans pratiquement toutes les entreprises de transformations et de manifacturations. Les déchets plastiques sont très faciles à transformer, mais leurs déchets sont souvent non biodégradables.

Par ailleurs, compte tenu des exploitations intensives des ressources minérales locales, on constate une certaine recrudescence des déchets de transformation des pierres industrielles, semi-industrielles, voire semi-précieuses et précieuses en termes de lapidairerie. Cela nous amené à choisir le thème de ce mémoire qui est une « initiation à la production des matériaux composites, déchets plastiques-déchets de lapidairerie ». On envisagera des simples ne nécessitant pas des matériels sophistiqués pour obtenir des produits de propriétés physico-mécanique fiables mais pouvant trouver diverses applications à l'échelle artisanale.

La première partie de ce mémoire traite les études bibliographiques dans lesquelles, nous avons introduit des généralités sur les lapidairies de Madagascar, ensuite les matériaux plastiques « PET » et les généralités des matériaux composites.

Dans la seconde partie, nous passerons en revue des études expérimentales qui sont composées de l'identification des matières premières utilisés, le processus de fabrication du matériau et l'impact environnemental. Nous voudrions signaler que seules ont été rapportées dans cet ouvrage les formulations que nous avons jugées probantes.

## **PREMIERE PARTIE : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES**

# **Chapitre I : GENERALITES SUR LES RESSOURCES MINERALES DE MADAGASCAR**

## **I-1 : Historique**

Dès sa découverte, Madagascar a eu la réputation de renfermer des gemmes. En 1547, le deuxième Français qui aborda dans l'île, le capitaine Jean Fonteneau, dit Alphonse-le-Saintongeois, déclare qu'il s'y trouve « des piergeries ». Cent ans plus tard, en 1658, Flacourt parle de topazes, d'aigues-marines, d'émeraudes, de rubis, de saphirs. Jusqu'au milieu du siècle dernier, tous les voyageurs qui ont écrit sur Madagascar ne se lassent pas d'y signaler l'abondance des gemmes, bien que plusieurs tentatives d'exploitation pratique faites aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles par la Compagnie Française des Indes aient échoué lamentablement. En 1663, Carpeau du Saussay signale « quantité de piergeries, topazes, aigues-marines et autres cristaux : il en aurait rapporté en France ou l'on n'en fit pas grand cas ».

Bref, Madagascar possède une étonnante et importante potentialité en ressources minérales. Et cela est d'ailleurs justifié jusqu'à présent étant donné les différentes « ruées » vers les pierres semi-précieuses, précieuses, et industrielles que l'on observe presque partout dans l'île. [1]

## **I-2 Mode de gisement**

### **I-2.1 Gisements en place [2]**

Si l'on excepte la cordiérite et quelques grenats qui gisent dans les schistes cristallins, les pierres précieuses malgaches connues en place font toutes parties des pegmatites granitiques.

### **I-2.2 Eluvions**

Presque tous les gisements malgaches ont été exploités tout d'abord, non pas dans la pegmatite absolument en place, mais sur des eluvions recouvrant celle-ci ou en étant peu éloignées. La découverte a lieu en général sur des points d'enrichissement d'origine mécanique et ce fait explique un préjugé que j'ai vu exprimer si généralement à Madagascar qu'il me paraît utile de chercher à le discuter.

### **I-2.3 Alluvions**

A Madagascar, les gemmes des pegmatites ne sont que rarement recherchées dans les alluvions. Je ne citerai guère à cet égard que les grosses topazes roulées d'Ifempina et certains grenats.

Par contre, une partie des grenats (almandin pyrope) qui proviennent des gneiss sont recueillis dans des rivières ; il en est de même pour les petits cristaux de corindon bleu recherches dans les alluvions basaltiques.

#### **I-2.4 Mode d'exploitation**

La ou les gemmes sont extraites de la roche intacte, celle-ci est abattue à l'aide de barres à mine pointues aux extrémités et dont les ouvriers se servent comme de leviers, après les avoir enfoncées de 15 à 20 centimètres dans la pegmatite. Celle-ci, une fois désagrégée, est jetée à la pelle dans un courant d'eau qui entraîne les matières Légères ; les gemmes et les autres matières lourdes sont enfin recueillies à la main. On évite le plus possible l'emploi des explosifs, car ceux-ci ont l'inconvénient de briser ou de fissurer les gemmes et de les rendre souvent inutilisables à plusieurs mètres au-delà du point où s'est produite de l'explosion.

#### **I-3 Pierres d'ornementation et d'industrie**

En outre des gemmes, Madagascar renferme un grand nombre de minéraux susceptibles d'être recherchés pour la fabrication de bibelots artistiques, d'objets d'ornementation et d'instruments nécessaires à diverses industries. Sauf en ce qui concerne le cristal de roche, cet emploi des pierres de la Grande Ile n'a pas jusqu'à présent attiré beaucoup l'attention des prospecteurs, mais l'exemple des Etats-Unis, dont les statistiques minières renferment tant d'exemples d'utilisations de ce genre, ne devrait pas être perdu de vue.

Ce sont par exemple les quartz (améthyste, quartz rose, quartz hyalin...), Calédonie, Agate, Amazonite....

#### **I.4. Quelques informations sur la lapidairerie à Madagascar**

Les touristes qui viennent à Madagascar sont inévitablement attirés par les produits artisanaux malgaches dont les plus convoité sont les produits de la lapidairerie. En effet, dans les régions des Hauts-plateaux, on rencontre toujours des lapidaires artisans et par conséquent, il y a toujours des déchets qui en sont engendrés. Jusqu'à présent ces déchets-là semblent non encore bien exploiter. En tout cas, il est relativement aisé de faire la collecte de ces déchets sans envisager de prix de revient élevé.

## Chapitre II : GENERALITES SUR LES POLYMERES

### II.1. Introduction [3]

Les plastiques ont connu avant le premier choc pétrolier (1974) l'une des plus fortes progressions industrielles (15 à 16 % par an). Depuis, la consommation et sa progression se maintiennent à un niveau élevé, qui amène les ingénieurs à s'intéresser maintenant aux matières plastiques au moins autant qu'aux autres matériaux.

Les entreprises, petites, moyennes ou grandes les mettent en œuvre ou les utilisent, toujours en grande quantité. En d'autres termes, plus de cinq millions de tonnes de matières plastiques, produites ou formulées sont contrôlées, utilisées, transformées en objets finis ou en demi-produits par plusieurs centaines de milliers de mécaniciens, avec des machines construites par des mécaniciens aidés d'électroniciens et d'informaticiens.

Les polymères, tenus en grande suspicion à la fin du siècle dernier à cause de leur absence de caractéristiques physiques définies, ont gagné, grâce aux efforts de chercheurs comme Carothers, Champetier, Houwink, Mark, Staudinger, le droit d'être considérés comme des espèces chimiques identifiées, faisant partie d'une science en pleine expansion. L'enseignement dans les écoles de chimie comporte toujours maintenant un cours de chimie et de physique macromoléculaires. Cette reconnaissance de la science des polymères a été à l'origine de la création de la plasturgie et ensuite de la science des matériaux grâce à la conception de nouveaux polymères renforcés que sont les Matériaux composites.

Actuellement, les plastiques et les composites à matrice organique ont permis tant de prouesses techniques en aéronautique et en sport de compétition que le mot « plastique » a maintenant des vertus promotionnelles et que les présentateurs n'hésitent plus à préciser la nature exacte des matériaux : « cette pièce est en ABS », « cet objet est en polypropylène ». C'est-à-dire que nous vivons actuellement l'ère des plastiques.

La littérature qui expose les méthodes d'analyse des polymères, les cinétiques des réactions qui permettent de les fabriquer, leurs modifications photo ou radiochimiques, leurs caractéristiques structurales, leur configuration, est très abondante. Les ouvrages, les traités, les revues, les brevets qui concernent la chimie macromoléculaire sont nombreux.

### II.2. Monographie du PET « Polyéthylène téréphthalate »

#### II.2.1. Introduction

Parmi les polyesters thermoplastiques saturés, seuls les polyéthylènes téréphthalates ou PET sont utilisés pour la fabrication de films et feuilles.

Sont concernées par cette application deux familles de produits :

- les homopolymères d'acide téraphthalique et d'éthylène glycol (PET) ;
- les copolymères fabriqués à partir de deux acides avec un diol, ou d'un seul acide avec deux diols.

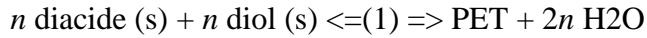
Les films obtenus, en différentes épaisseurs, à partir de ces polymères, par extrusion ou thermoformage, possèdent d'excellentes propriétés thermomécaniques, optiques, électriques et une bonne résistance chimique. De plus, ils sont métallisables.

Ces films, orientés par étirage ou non orientés, ont trouvé de nombreuses applications dans l'audiovisuel, dans l'emballage, dans les domaines électrique et électronique, etc.

Dans l'industrie, on utilise souvent les désignations APETP (ou APET) et CPETP (ou CPET) se référant à l'état amorphe (A...) ou à l'état cristallin (C...) de l'homopolymère considéré, et PETG pour le copolymère modifié par un glycol.

### **II.2.2. Synthèse chimique des polymères [4]**

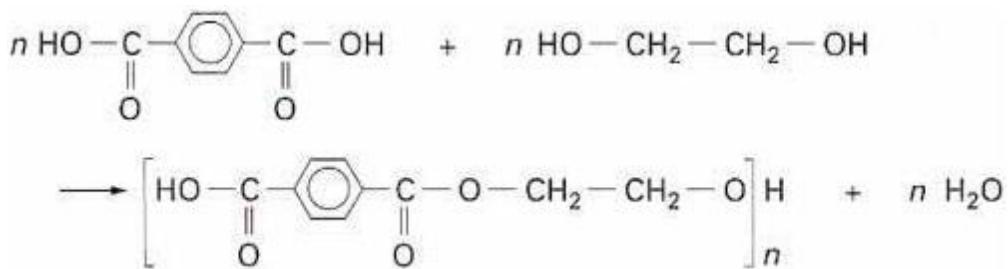
Les divers polyéthylènes téraphthalates sont des polymères obtenus par polycondensation d'un ou de deux diacides avec un ou deux diols, selon le schéma réactionnel suivant :



C'est une réaction équilibrée : pour produire le polyester, il faut aller dans le sens (1) avec élimination d'eau. Par contre, si le polyester est amené à l'état fondu en présence d'eau, l'équilibre se déplace dans le sens (2). L'eau provoque la rupture des chaînes macromoléculaires, ce qui conduit, entre autres, à une diminution des propriétés mécaniques.

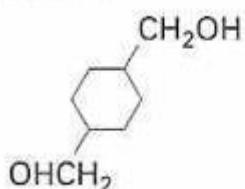
Les divers PET sont, en général, caractérisés par leur indice limite de viscosité, mesuré en solution suivant la méthode normalisée NF ISO 1628-5 (indice de classement T 51-542).

Une faible valeur d'IVL correspond à une relativement faible masse molaire. Les produits commerciaux courants pour la fabrication de films et de feuilles ont un IVL compris entre 0,74 et 1,05 mL/g.



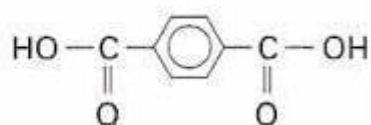
**Figure 1 : Polycondensation d'acide téraphthalate et d'éthylène glycol**

CHDM :



et d'un second acide.

Acide téraphthalique :



**Figure 2 : cyclohexanediméthanol-1,4 (CHDM), Acide téraphthalique**

### II.2.3. Mise en œuvre

En général, les films de PET sont fabriqués par ce procédé. Une ligne est composée d'une extrudeuse mono vis munie d'une tête d'extrusion avec filière droite, d'une lame d'air, de cylindres refroidisseurs et d'un ensemble de tirage et d'enroulement du film. Le film à plat est toujours légèrement *mono-orienté*. Certaines machines sont équipées d'une pompe à engrenage pour assurer un débit parfaitement régulier, montée entre l'extrudeuse et la tête d'extrusion. L'extrudeuse doit avoir un rapport  $L/D$  (longueur/diamètre) de la vis d'au moins 24, de préférence 30, pour obtenir un débit régulier. La vis d'extrusion, d'un taux de compression de 3 à 3,5, est munie d'une zone de malaxage. Le débit d'une extrudeuse de 90 mm et de  $L/D = 24$  est de 300 à 320 kg/h pour une vitesse de rotation de la vis de 95 tr/min.

L'utilisation de grandes quantités de matière recyclée ( $\geq 30\%$  en masse) nécessite que la machine soit équipée d'une pompe à engrenage.

La tête d'extrusion est équipée d'une barre de restriction carénée et de lèvres flexibles et réglables. L'entrefer de la filière doit être au moins de 25 % supérieur à l'épaisseur du film et sa longueur recommandée est de 25 à 32 mm pour un film de 250 µm et de 32 à 50 mm pour les films d'épaisseur supérieure à 250 µm. Les conditions de mise en œuvre propres au PET ont été rassemblées dans le (tableau 1).

**Tableau 1 : Conditions de mise en œuvre des films de PET**

| Conditions de mise en œuvre<br>des films en PET   |   |
|---|---|
| ➤ EXTRUSION   |   |
| • Profil des températures (°C) de la zone d'alimentation à la sortie de l'extrudeuse..... | 270-295-295-280-270                       |
| • Température (°C) du raccord à la tête d'extrusion .....                                 | 270                                       |
| • Température (°C) de la tête d'extrusion.....  | 270                                       |
| Distance (cm) entre la sortie de la filière et le premier cylindre refroidisseur .....    | 6 à 7                                     |
| Température des cylindres refroidisseurs Θ (°C).....                                      | 40<θ<70                                   |
| ➤ THERMOFORMAGE   |   |
| Température du film .....   | 140 à 160 °C                              |
| Température du moule .....  | 40 à 60 °C                                |
| Température du poinçon .....  | 120 à 135 °C                              |
| Pression de thermoformage.....  | 0,2 à 0,3 MPa                             |
| Vide.....   | 500 à 660 mm Hg<br>(soit 66,7 à 86,7 kPa) |

Source [4]

#### **II.2.4. Propriétés**

Les films et feuilles en PET sont caractérisés par une rigidité (figure 3) et une résistance à la rupture (figure 4) élevées à la température ambiante, et satisfaisantes à des températures allant jusqu'à 150 °C (figures 3 et 4). Les copolymères amorphes ont de bonnes résistances aux chocs, même à basse température.

À titre d'exemple, la résistance à l'impact d'un film de 250µm d'épaisseur en APET est de :

- 500 g à 23°C
- 400 g à – 18°C (mesurée selon la norme **ASTM**)

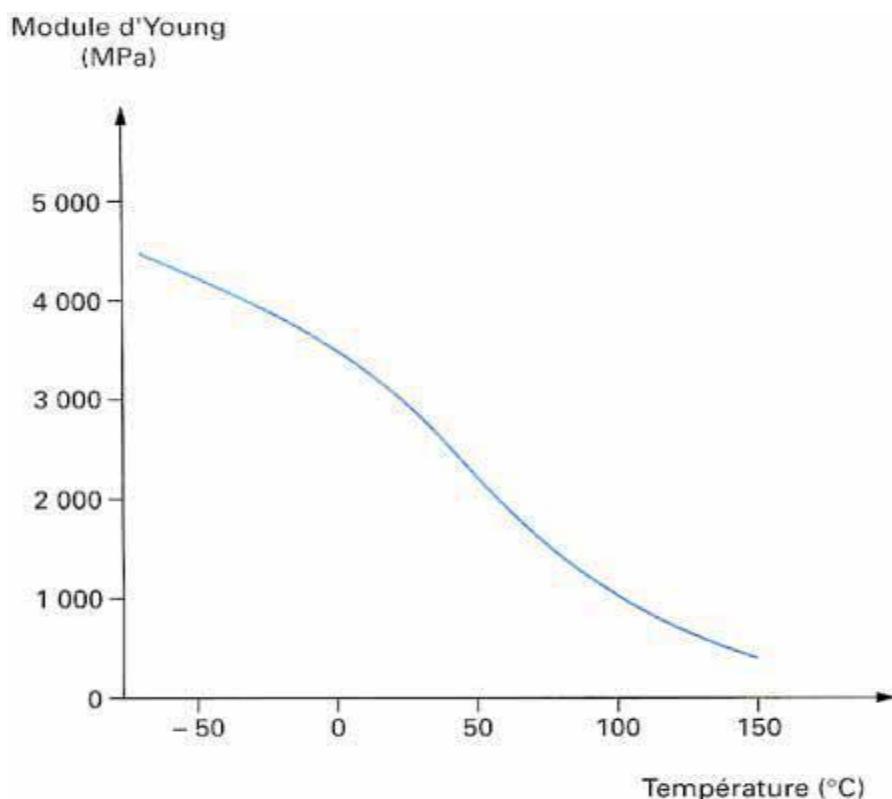
En plus de leur rigidité très élevée ( $\geq 4\ 500\ MPa$ ), les films orientés ont une résistance à la déchirure exceptionnelle.

**Tableau 2 : Propriétés principales des PET (résines ou films et feuilles) mesurées à 23°C et 50 % HR**

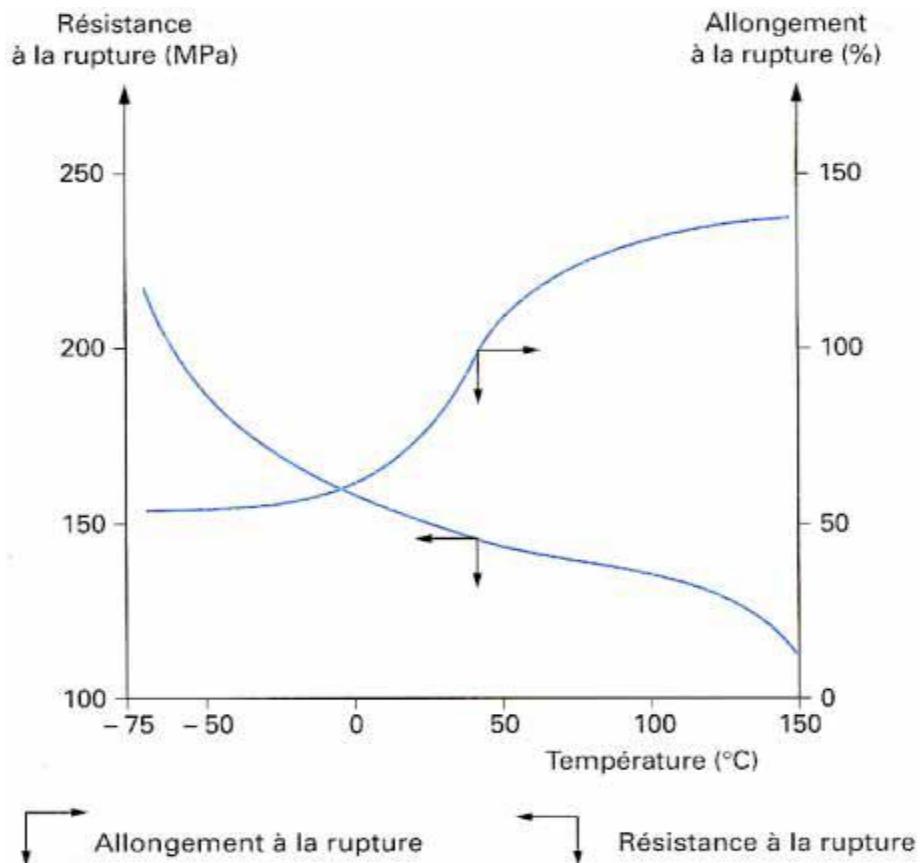
|  | Norme (1)  | Unité                                   | PET semi-cristallin | APET (2)<br>amorphe |
|--|------------|---|---------------------|---------------------|
| <b>PROPRIÉTÉS PHYSIQUES</b>                        |            |   |                     |                     |
| . Masse volumique.....                             | NFT 51-063 | g/cm <sup>3</sup>                       | 1,4                 | 1,4                 |
| . Indice limite de viscosité.....                  | ASTM D 570 | mg/L                                    | 0,74 à 0,85         | 0,80 à 1,05         |
| . Absorption d'eau (24 h) .....                    | NFT 51-621 | %                                       | 0,1 à 0,2           | 0,1 à 0,2           |
| . Température de fusion.....                       | NFX 10-021 | °C                                      | 249 à 271           | 245 à 250           |
| . Conductivité thermique .....                     |            | W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>      | 0,13 (3)            | 0,25                |
| . Capacité thermique massique.....                 |            | kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> | 1,1 à 1,3           | 1,1                 |
| <b>PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES des films d'épaisseur</b> |            |   | 10 à 25µm           | 250µm               |
| . Résistance à la rupture, L/T .....               | DIN 53455  | MPa                                     | 240/225             | 58/39               |
| . Allongement à la rupture, L/T.....               | DIN 53455  | %                                       | 90/110              | 300/200             |
| . Module d'Young, L/T.....                         | DIN 53457  | MPa                                     | 5 300/4 500         | 2 200/2             |
| . Résistance à l'impact, L/T .....                 | DIN 53448  | mJ · mm <sup>-2</sup>                   | 1 400/2 000         | 200                 |
| . Résistance à la déchirure, L/T.....              | DIN 53363  | N · mm <sup>-1</sup>                    | 220/250             |                     |
| . Retrait à 150°C, 15 min, L et T .....            | DIN 40634  | %                                       | ≤0,2                | 40/50               |
| <b>PROPRIÉTÉS OPTIQUES des films d'épaisseur</b>   |            |   | 10 à 25µm           | 250µm               |
| Trouble .....                                      |            |   | < 15                | < 1                 |
| Brillance, 45°.....                                | ASTM D1003 | %                                       |                     | 108                 |

|  |                            |        |    |    |
|--|----------------------------|--------|----|----|
| Transparence .....   | ASTM D 2457<br>ASTM D 1746 | %<br>% | 85 | 85 |
| (1) Se reporter aux articles de la rubrique <i>Essais normalisés</i> , dans le présent traité. |                            |        |    |    |
| (2) Copolymère de cyclohexanediméthanol-1,4, d'acide téraphthalique et d'un second acide.      |                            |        |    |    |
| (3) Mesuré sur films de 12µm d'épaisseur.  |                            |        |    |    |
| L sens longitudinal  |                            |        |    |    |
| T sens transversal   |                            |        |    |    |

Source [5]



**Figure 3 : Variation du module d'Young en traction en fonction de la température d'un film en PET**



**Figure 4 : Comportement thermomécanique en traction d'un film en PET d'épaisseur 23 µm**

### II.2.5. Applications

Les divers films et feuilles en PET proposés sur le marché se différencient par leur épaisseur, leur largeur, leur longueur, le diamètre extérieur de la bobine et leur composition. En raison de leurs bonnes propriétés thermomécaniques, optiques et électriques, ils ont trouvé de nombreuses applications dans les secteurs des industries électriques, l'électronique, l'audiovisuel, les arts graphiques, les fournitures de bureaux, les emballages divers, etc.

### II.3. Les déchets plastiques

#### III.3.1. Règlementation [6]

Le mot environnement a pris ces dernières années une importance considérable. Aux notions esthétiques (décharges sauvages, pollutions visuelles) sont venues s'ajouter celles concernant l'hygiène et la sécurité, puis celles concernant la protection de l'homme, de tous les règnes de la nature et de leur équilibre.

Les facteurs relatifs à l'énergie, à la pollution de l'air et de l'eau, le volume de déchets solides et leur devenir sont maintenant simultanément pris en considération. Cette notion

d'environnement doit aussi être compatible avec un développement économique nécessaire et acceptable.

Dans ce contexte et comme pour tous les autres matériaux, les nuisances et les problèmes imputables aux matières plastiques peuvent se produire lors de :

- l'extraction ou l'obtention des matières premières ;
- la fabrication (production, transformation) des résines, des compositions, des matériaux, etc. ;
- l'utilisation des objets ou de l'élimination des déchets.

On considère maintenant la vie d'un produit de sa conception à son élimination et l'analyse du cycle de vie ; les écobilans ou éco balances deviennent des éléments de décision importants à la fois pour les hommes politiques, les gestionnaires de produits (fabricants, distributeurs, acheteurs) et les consommateurs.

Les réglementations françaises et communautaires sont en principe non discriminatoires par rapport à la nature des matériaux et ne concernent réellement que la fonction (éléments de bâtiment, emballages, etc.).

Les plastiques comme tous les autres produits au cours des divers stades de leur vie sont concernés par les différentes réglementations présentées dans le tableau suivant.

**Tableau 3 : Catégories de réglementations**

|   |   |
|---|---|
| Fabrication<br>(production ou transformation) | Établissements classés<br>Contrôle des produits chimiques<br>Contrôle des substances<br>Dangereuses<br>Transports<br>Lutte contre les pollutions<br>Économies de matière<br>Économies d'énergie<br>Élimination des déchets<br>Industriels |
| Utilisation                                   | Normalisation<br>Marques de qualité (qualification)<br>Protection des consommateurs   |
| Élimination                                   | Collecte des déchets municipaux<br>(ménagers et commerciaux)<br>Valorisation et le traitement des déchets :<br>— décharge<br>— recyclage<br>— incinération  |

**Source :** [6]

### III.3.2. Types

On distingue 3 types de déchets plastiques selon leurs catégories et leurs secteurs d'application :

- **Déchets industriels** : les industries qui fabriquent des objets plastiques sont souvent des productrices des déchets plastiques, c'est-à-dire les produits hors spécification correspondant à des opérations de fabrication.

- **Déchets de distribution** : ce sont les déchets comme les polystyrènes expansés, bidons, les bouteilles en PET, emballages de protection en polystyrène, housses, etc... Qui arrivent dans les grands magasins de distributions.

- **Déchets des consommateurs finaux** : ces déchets sont obtenus par les matières plastiques qui viennent du consommateur de matériaux plastiques.

### **III.3.3. Valorisations des déchets**

On peut valoriser les déchets plastiques en récupérant la partie importante de la matière qui est recyclable et régénérable ou encore par utilisation de leur pouvoir calorifique.

On peut particulièrement distinguer trois types de valorisation des déchets :

- La valorisation matière
- La valorisation chimique
- La valorisation énergétique.

#### **a- La valorisation matière**

C'est lorsque la matière du déchet peut être réintégrée dans la production du nouvel matériau sans détruire sa structure chimique.

#### **b- La valorisation énergétique**

On peut aussi l'appeler recyclage thermique, c'est-à-dire dans le cas de thermoplastique. Il y a une valorisation énergétique lorsque la matière du déchet est transformée en énergie thermique, grâce à son pouvoir calorifique.

#### **c- La valorisation chimique**

Lorsque les molécules de base des plastiques sont dissociées dans le but de réaliser les produits chimiques intermédiaires utilisables pour de nouvelles synthèses.

# **Chapitre III : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES**

## **III.1. Introduction [6]**

Une rubrique importante du présent traité « Plastiques et Composites » est consacrée aux plastiques renforcés, c'est-à-dire aux matériaux constitués par une matrice organique renfermant des fibres souvent réparties de façon optimale pour assurer la plus grande résistance dans la direction des plus grandes contraintes.

On peut donc supposer que l'analyse de leur comportement et la prévision de leurs propriétés vont faire intervenir les caractéristiques de la matrice, celles des fibres, des problèmes d'interface et des conditions de fabrication. En effet, les propriétés mécaniques des composites sont très dépendantes des fibres employées : nature, répartition, taux, longueurs, diamètres, ensimages... Toutefois, les propriétés mécaniques, électriques, chimiques, photochimiques, thermiques sont largement affectées par celles de la matrice (en particulier par les températures de transition et de fusion pour les thermoplastiques) et cela d'autant plus que la fibre est plus courte et en plus faible proportion.

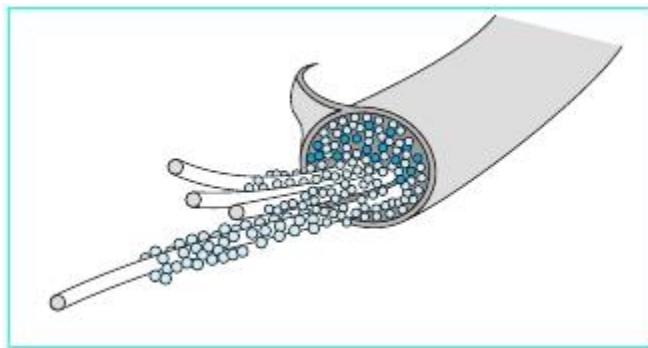
Une bonne connaissance des plastiques renforcés doit donc être fondée sur celle des renforts et des matrices.

## **III.2. Principaux constituants**

### **III.2.1. Matrices**

Pour des raisons de facilité de mise en œuvre sans pression, ce sont les polymères transformés à l'état liquide qui ont été initialement choisis pour servir de matrices et qui continuent à être le plus souvent employés. On peut dire que depuis, tous les plastiques ont été utilisés avec plus ou moins de succès pour la fabrication des différents composites à fibres courtes qui s'injectent, s'extrudent, se moulent comme les résines pures ou à fibres longues comme les TRE ou les FIT. Tous ces polymères sont décrits dans le présent traité qui consacre au moins une monographie à chacune des résines employées. [7]

Par exemples : Polyesters insaturés (UP), Résines vinylesters, Polyépoxydes (EP), Polyuréthannes (PUR), Formophénoliques (PF), Silicones (SI), Poly (bismaléimides).



**Figure 5 : Imprégnation de FIT**

#### a- Matrices thermoplastiques

Elles ont été employées plus tardivement. Cela s'explique facilement par la difficulté d'introduire des fibres fragiles sans les rompre et par leur thermo plasticité qui les rend vulnérables à des températures faibles mais qui facilite en compensation leur mise en oeuvre. En effet, les thermoplastiques sont à l'état fondu beaucoup plus visqueux que les polyesters par exemple. L'utilisation d'un solvant n'est pas une solution satisfaisante car il faut l'évaporer après l'imprégnation des fibres. La solution, envisagée par Atochem pour le FIT, a consisté à faciliter l'imprégnation d'une mèche en introduisant des particules sphériques du polymère choisi entre les filaments, en gainant la mèche avec le même polymère et en contrôlant la granulométrie de la poudre pour que le diamètre moyen des particules soit du même ordre que celui des fibres. L'introduction de la poudre et sa dispersion à l'intérieur de la mèche pouvait être faites en bénéficiant d'une attraction électrostatique et en faisant passer la fibre dans un lit fluidisé de la poudre.

La gaine souple ainsi obtenue pouvait servir à la fabrication de semi-produits : tissus, tresses, tricots, et à la réalisation de pièces par pultrusion, enroulement filamentaire, ou les tissus réalisés à l'aide du FIT pouvait être empilés et moulés par compression. En effet, ce problème d'imprégnation étant résolu (quelle que soit la méthode), le composite à matrice thermoplastique résultant peut être chauffé, mis en forme puis refroidi, et conserver de cette façon la géométrie qui lui a été imposée, cette opération étant réversible. Cette facilité de mise en oeuvre est malheureusement associée à leur thermo sensibilité signalée dans l'introduction qui pénalise leur utilisation comme composite à hautes performances : lorsque l'on atteint la température de transition vitreuse ou la température de fusion (polymères cristallins), le composite perd toute résistance. Leur usage s'est donc peu développé ; les polymères susceptibles de servir de matrice à des fibres courtes sont les polysulfones avec les poly-

(arylsulfones) et les poly(éthersulfones), les poly(étheréthercétones), les polycarbonates (PC), les polyamides (PA), les poly(éthylènetréphtalates) (PET).

En ce qui concerne les composites à matrice thermoplastique et à fibres longues, on peut citer en plus du FIT et de tous les polymères que l'on a essayé de lui associer l'utilisation du polypropylène (PP) dans la technique du TRE.

### **b- Matrices thermodurcissable**

C'est un produit de polycondensation, résultant d'une réaction de combinaisons classiques, entre les molécules différentes, avec élimination des résidus de la réaction.

#### **III.2.2. Renforts**

##### **a. Natures des renforts**

Les principaux types de renforts sont :

- Les fibres d'aramides (Polytétréphthalate de phénolène diamide)
- Les fibres de carbones (Polyacrylonitrile PAN)
- Les fibres de bores
- Les fibres de verres
- Les fibres d'origine naturelle (sisal, coton, bambou, lin,)

##### **b. Architectures de renforts**

Les renforts constitués de fibres ont de différentes formes suivantes :

- linéiques : fils, mèches ;
- tissus surfaciques : tissu, mats ;
- multidirectionnelles : tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus.

#### **III.2. Les charges [8]**

Elles sont le plus souvent minérales : carbonate de calcium, mica, talc, carbone (noir de fumée) qui modifie la conductivité électrique et a une influence sur les charges statiques, le graphite colloïdal, le disulfure de molybdène. La silice finement divisée est utilisée pour rendre les liquides thixotropes. On l'utilise dans les peintures, mais aussi dans les gelcoats, c'est-à-dire dans les revêtements de la surface des moules avec une résine colorée (UP, EP) que l'on retrouve à la surface de l'objet au moment du démoulage. La thixotropie conférée par la charge de silice facilite la mise en place de la résine qui est fluide pendant l'enduction du

moule et devient ensuite visqueuse et ne coule pas avant de durcir. L'utilisation d'un voile de surface améliore la tenue du gel coat. Les charges peuvent être plus rarement métalliques : aluminium et fer qui permettent d'augmenter la conductivité thermique des résines ; or ou argent qui augmentent la conductivité électrique (encres conductrices).

### III.3. Méthodes de mise en œuvre spécifiques

Nous avons vu que la plupart des matières thermoplastiques pouvaient être chargées avec des fibres courtes de verre ou de carbone. On renforce de préférence de cette façon les polymères qui sont destinés à des applications techniques : PA, poly (oxyméthylène) POM, PAS, (polyarylsulfone), PES (polyéthersulfone)... Ces matériaux peuvent être injectés, extrudés avec le matériel, les outillages et les techniques employés habituellement avec les plastiques non chargés et qui font l'objet d'articles spécialisés du présent traité. Par contre, des techniques originales ont été élaborées pour la mise en œuvre de composites à fibres longues. La description de ces méthodes spécifiques occupe évidemment une place importante dans la rubrique « Composites ».

Dans la technologie de mise en œuvre des matériaux composites, il existe de différents types de processus de mise en œuvre avec leurs principes :

- **MOULAGE AU CONTACT** : c'est une méthode artisanale qui consiste à imprégner manuellement le renfort d'une matrice thermodurcissable.
- **MOULAGE PAR PROJECTION SIMULTANE** : c'est un procédé de moulage de contact mécanisé.
- **MOULAGE SOUS-VIDE** : qui consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique.
- **MOULAGE PAR COMPRESSION** : ce moulage est distingué en quatre méthodes :

*Moulage par injection de résine* : qui consiste à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé.

*Moulage par compression à froid* : qui est effectué à basse pression (moins de 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exotherme de polymérisation de la résine.

*Moulage par compression à chaud* : cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants.

*Moulage par injection* : cette méthode est la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés, ce moulage est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

- **MOULAGE EN CONTINU** : qui permet la fabrication de plaques planes, panneaux, de panneaux endurés pour toitures, etc...
- **MOULAGE PAR PULTRUSION** : cette méthode est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables.
- **MOULAGE PAR CENTRIFUGATION** : cette technique est pratiquement réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, cuves, tuyaux, etc... et permet aussi d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieure, de diamètre et d'épaisseur des pièces bien calibrés.

### **III.4. Domaines d'application des MC**

Nous les trouvons dans tous les domaines comme :

- L'aéronaval ou aéronautique : frein en carbone, coque, pales, ...
- Le spatial : protection thermique, ...
- Le bâtiment : béton, ...
- L'automobile : plaquette de frein, pneu, carrosserie, etc...
- Le ferroviaire : suspension
- Les constructions navales : coques, mat et voiles
- Le domaine de la médecine : Ophtalmologie (lentille, coussinet de récupération)  
Chirurgie orthopédique (prothèses articulaires : genou, coude, cheville...)
- Electricité : Eolienne et panneaux solaires
- Sportives : Ski, tennis, vélos de compétition, coques et freins pour F1

## **DEUXIEME PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES**

## **Chapitre IV : ENQUETE AUPRES DE LA LAPIDAIRERIE ANTSIRABE (cercle la MESS)**

### **IV.1. Extraction**

D'après une enquête menée auprès des lapidaires, leurs matières premières sont extraites dans les carrières des régions suivantes : VAKINAKARATRA plus précisément à MANDOTO, AMORON'I MANIA, ANTSIRABE et MIANDRIVAZO. Pour cela, une pelle est utilisée.

### **IV.2. Classification et analyse**

Après l'extraction, les matières premières sont transportées jusqu' à leur atelier. C'est ainsi que l'analyse commence afin de connaître les propriétés physiques des matières premières.

On distingue généralement trois catégories de pierres :

- Celles dites ornementales, certains utilisent le terme plutôt dévalorisant « d'industrielles » comme le jaspe ou la labradorite, les pierres fines, ... ;
- Les pierres « semi-précieuses » parmi lesquelles on trouve l'améthyste, la citrine ou l'aigue-marine,
- Les pierres précieuses comme le saphir, le rubis, l'émeraude, le diamant, ...

Le tableau ci-dessous nous montre la dureté et la ténacité de quelques pierres précieuses et de pierres fines (ou ornementales)

**Tableau 4 : Echelle de Mohs sur la dureté et ténacité des gemmes**

| Pierre     | Dureté    | Ténacité | Pierre           | Dureté    | Ténacité |
|------------|-----------|----------|------------------|-----------|----------|
| Diamant    | 10        | 7,5      | Corindon         | 9         | 8        |
| Rubis      | 9         | 4,7      | Saphir           | 9         | 8        |
| Topaze     | 8         | 5        | Aigue-marine     | 7,5 – 8   | 5,5      |
| Béryl      | 7,5 – 8   | 6,5      | Émeraude         | 7,5 – 8   | 5,5      |
| Tourmaline | 7 - 7,5   | 6,5      | Améthyste        | 7         | 7        |
| Citrine    | 7         | 7        | Cristal de roche | 7         | 7        |
| Quartz     | 7         | 7        | Grenat           | 6,5 - 7,5 | 5 - 6    |
| Zircon     | 6,5 - 7,5 | 5,5      | Kunzite          | 6,5 – 7   | 5        |
| Péridot    | 6,5 - 7   | 6        | Opale            | 5,5 - 6,5 | 4        |

Après l'analyse, on procède à la taille, qui mettra en valeur les qualités recherchées.

Pour cela, deux techniques sont utilisées : le cabochon et la facette

- Le **cabochon** : c'est une pierre qui, une fois taillée, est arrondie ou bombée à son sommet. Cette technique met en valeur les couleurs et les impressions des pierres opaques comme le jaspe, l'amazonite,
- La **facette** : les pierres taillées en facettes ont une série de surfaces planes et polies. Cette technique permet de réfléchir incroyablement la lumière et de donner ainsi de l'éclat et de la brillance aux pierres transparentes ou translucides comme le quartz, le rubis, le saphir, l'émeraude ou l'agate,

En général, les lapidairies d'Antsirabe ne disposent pas des équipements mécaniques et électriques sophistiqués, ils utilisent tout simplement des machines industrielles pour le taillage des pierres.



**Photos 1 : atelier**

Les déchets de lapidairerie sont stockés et transportés dans un endroit sec.

#### **IV.3. Préparation**

##### **IV.3.1. Etapes de taillage sur la machine**

###### **a. Premièrement : Préparation de la matière première :**

Il s'agit d'une ébauche de la forme obtenue en utilisant une scie diamantée. La matière brute présente alors après cela plusieurs faces polies selon la forme souhaitée. On rappelle que le diamant est le plus dur de tous les matériaux et permet ce travail d'ébauche et de toute la suite du taillage.



**Photos 2 : Cie diamanté**

###### **b. Deuxièmement : mise en forme**

Une meule réglable permet d'enlever les traces de sciage et d'affiner la forme voulue. La meule est fabriquée artisanalement à partir de poudres de corindon liées avec une résine initialement liquide et solidifiées, après cuisson (Composites à matrice organique avec renfort grain de corindon)

On rappelle que le corindon est le matériau le plus dur après le diamant. Ce polissage est suivi d'un polissage fin utilisant un papier diamanté, enlevant les rayures des corindon.



**Photos 3 : Meule réglable ronde**



**Photos 4 : Meule Fine**

### c. Troisièmement : Près-polissage

Le polissage suivant utilise le papier Norton, qui est spécifique pour l'abrasion des pierres en vue d'obtenir les formes déterminées. Ce papier est utilisé durant un jour et permet de travailler 5kg de pierres. Il est ensuite remplacé.



**Photos 5 : Papier Norton**

**d. Quatrièmement : Polissage final et finition**

On utilise pour cela des meules avec de la poudre diamantine pour amortir les chocs éventuels, on plie sous la poudre diamantine un tissu (morceaux de jeans par exemple).

Le moteur utilisé a une puissance de 2CV et coûte environ 600.000ar

Pour chaque étape, il y a généralement quatre manipulateurs.



**Photos 6 : Meule en tissus épais avec poudre diamantine**



**Photos 7 : Caractéristique moteur**

#### IV.4. Produits finis

Les produits taillés sont nombreux (boules, pendentifs, articles de décoration, cendrier, etc.) et sont commercialisés sur le marché.

Le Tableau 5 ci-après nous montre les divers produits taillés avec leur prix pour les étrangers et les Malgaches.

**Tableau 5 : prix de produit lapidaire**

| <b>Produit</b>   | <b>Prix</b>   |  |
|--|---|--|
|  | <b>Malgache</b>   | <b>Etranger</b>  |
| Boule en beryl, en jaspe   | 3000ar  | 10 000ar   |
| Solitaire, Cendrier, produit un peu plus grand en (Basalte, Amazonite) | 20 000ar, 25 000ar  | 70 000ar jusqu'à 100 000ar                             |
| Les produits en quartz (petit décoration, perde massage,...)           | 1 000ar (petit environ 1kg à 2kg)<br>3000ar (moyen 5kg)<br>6000ar (grand 8kg) | 5000ar (petit)<br>10 000ar (moyen)<br>20 000ar (grand) |

# Chapitre V : IDENTIFICATION DES MATIERES PREMIERES

## V.1. Les déchets de PET

### V.1.1. Collecte et tri des déchets

On trouve souvent les déchets plastiques dans les bacs à ordure, dans toutes les rues. Les déchets ainsi collectés sont triés à la main afin de séparer les bouteilles en PET des autres bouteilles. Pour cela, les déchets collectés sont versés par terre, puis, on effectue le tri en se référant au code d'identification du PET, qui se trouve au fond de la bouteille.

La figure suivante montre le code d'identification du PET :



Figure 6 : code d'identification du PET

### V.1.2. Traitements des déchets de PET

Obligatoirement, on va traiter les déchets avant de les utiliser pour avoir un bon résultat.

#### a. Nettoyage ou lavage :

Les déchets subissent alors un nettoyage ou lavage pour pouvoir enlever facilement les colles, les étiquettes et les saletés.

#### b. Séchage :

On effectue le séchage à l'air libre pendant quelques heures parce que les traces d'eaux seront nuisibles au chauffage de la matière si on n'effectue pas cette étape.

#### c. Déchiquetage :

Cette opération consiste à fragmenter les bouteilles en PET en petite dimension. Elle s'effectue à l'aide d'un couteau ou des ciseaux. Le but est de faciliter et accélérer le chauffage de matière plastique.



**Photos 8 : Déchiquetage**

### V.1.3. Rappel des caractéristiques de PET

Le PET possède les caractéristiques ci-après :

**Tableau 6 : Caractéristiques de PET**

| <b>Propriétés mécaniques</b>      |   |
|-----------------------------------|---|
| Coefficient de frottement         | 0,2 – 0,4   |
| Coefficient de poisson            | 0,37 – 0,44   |
| Dureté-Rockwell                   | M94 – 101   |
| Module de tension                 | 2 – 4 [Gpa]   |
| <b>Propriétés physiques</b>       |   |
| T° transition vitreuse            | 70 °C   |
| T° fusion                         | 245 °C  |
| Paramètre de solubilité           | δ20,5 J1/2·cm-3/2 ; 21,9 MPa1/2                           |
| Masse volumique                   | 1,34–1,39 g·cm-3  |
| Conductivité thermique            | 0,15 W·m-1·K-1  |
| <b>Propriétés thermiques</b>      |   |
| Chaleur spécifique                | 1200 – 1350 JK-1Kg-1                                      |
| Coefficient d'expansion thermique | 20 – 80. 10-1 K-1   |
| Conductivité thermique à 23°C     | 0,15 – 0,4 Wm-1   |
| Temps maximale d'exploitation     | 115 – 170°C   |
| Temps minimale d'exploitation     | - 40 à - 60°C   |
| <b>Propriétés électroniques</b>   |   |
| Constante diélectrique            | 3,25 (1 kHz, 23 °C)<br>3(1 MHz, 23 °C) 2,8 (1 GHz, 23 °C) |
| <b>Propriétés chimiques</b>       |   |
| Formule brute                     | C10H8O4   |
| Masse molaire                     | 192,1681 ± 0,0098 g/mol C 62,5 %, H 4,2 %, O 33,3 %,      |

Source [5]

## V.2. Lapidairerie

### V.2.1. Processus du traitement

#### a. Zone de prélèvement des déchets :

Nos déchets proviennent de la lapidairerie d'Antsirabe. Ils sont composés généralement des bris des pierres semi-précieuses confondues. Dans notre expérience, ces déchets servent des renforts dans le matériau composite.

On considère comme déchets :

- Les petits morceaux inaptes à la taille et les morceaux difficiles à travailler pour l'obtention de forme géométrique ;
- Les défauts (les cassures internes et externes de la matière première les autres défauts de l'extraction) ;
- Les bris expulsés lors du taillage de la pierre.

La photo suivante montre quelques échantillons des déchets :



Photos 9 : Echantillons des déchets

### **V.2.2. Broyage**

Les échantillons des déchets sont broyés avec un marteau afin d'avoir des grains de classes variables.



**Photos 10 : Broyage des pierres**

### **V.2.3. Granulométrie**

Pour déterminer la granulométrie de pierres broyées, on utilise des tamis (photo 11).



**Photos 11 : Tamis**

Les résultats de la granulométrie sont donnés dans le tableau et figure ci-après :

**Tableau 7 : Résultat de l'analyse granulométrique**

| <b>Granulométrique Module du tamis</b> | <b>Passants cumulés [%]</b> |
|--|-----------------------------|
| 33                                     | 98,6                        |
| 31                                     | 96,3                        |
| 28                                     | 84,7                        |
| 25                                     | 24,1                        |
| 22                                     | 2,1                         |
| 21                                     | 1,1                         |
| 20                                     | 0,5                         |

On a ci-après la courbe obtenue :

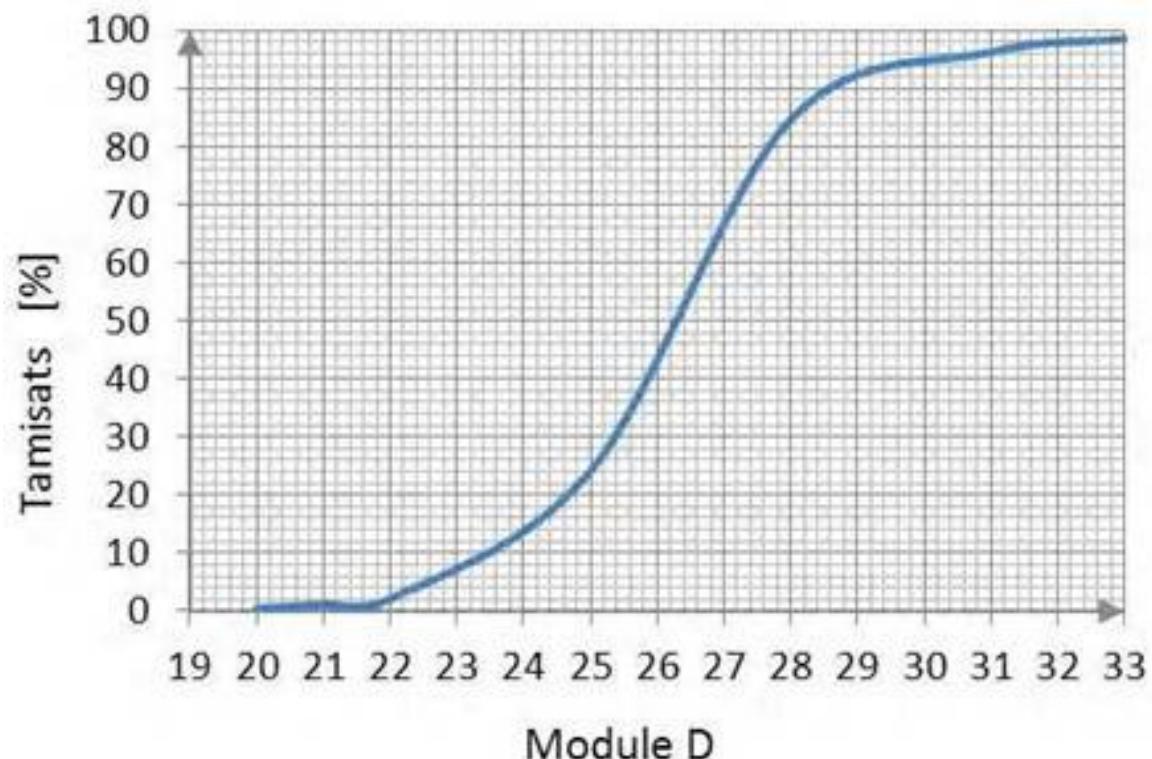


Figure 7 : Courbe granulométrique

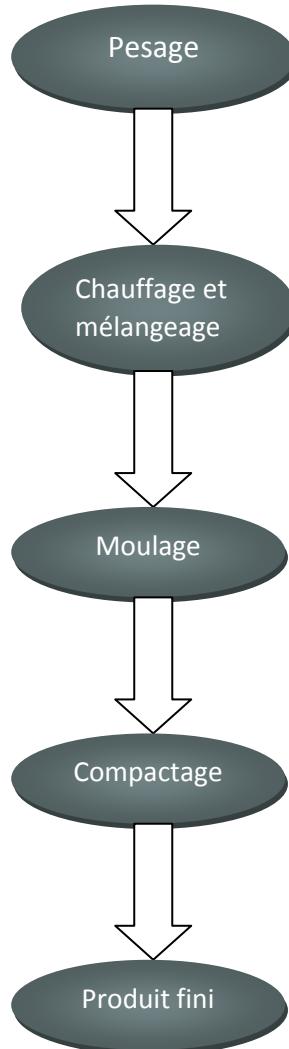
# Chapitre VI : FABRICATION DE MATERIAU COMPOSITE « PET-DECHETS DE LAPIDAIRERIE »

## VI.1. Introduction

On mélange les déchets de lapidairerie broyés avec les plastiques fondus pour avoir des matériaux solides bien homogènes. Le but est d'avoir des objets moulés durs.

L'organigramme ci-après donne le processus de fabrication de matériau composite « PET-déchets de lapidairerie ».

Préparation des matières premières :



## **VI.2. Formulation**

### **VI.2.1. Pesage**

Ce dosage consiste à peser les matières premières utilisées pour la fabrication du matériau composite. Pour cela, on utilise la balance de précision, de capacité 6000 g.



**Photos 12 : Balance de précision**

**Tableau 8 : Formulations proposées**

| Essai | Proportion en % |                              |
|-------|-----------------|------------------------------|
|       | Plastiques (Pl) | Déchets de Lapidairerie (DP) |
| N°1   | 50              | 50                           |
| N°2   | 60              | 40                           |
| N°3   | 65              | 35                           |
| N°4   | 70              | 30                           |
| N°5   | 80              | 20                           |
| N°6   | 90              | 10                           |

Source : auteur

### **VI.2.2. Chauffage et mélangeage**

- . Chauffer les déchets plastiques en PET (plastiques broyés) dans une marmite afin de transformer son état à l'état fondu ;
- . Verser progressivement dans la matière les grains de pierre ;
- . Mélanger le tout et bien malaxer jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène.



**Photos 13 : le mélange de lapidairerie et du PET à presque 248°C**

### **VI.2.3. Moulage et compactage**

Le moulage se fait de la manière suivante :

Revêtir les moules avec l'agent de démoulage. Dans notre cas, on utilise les huiles alimentaires usagées comme agent de démoulage.

Verser la pâte homogène dans les moules, puis compacter à l'aide d'une dame artisanale.



**Photos 14 : moule et dame de compactage**

Les produits obtenus prennent donc la forme des moules utilisés.

#### **VI.2.4. Démoulage**

Les matières qui débordent sont ébarbées, puis on passe au refroidissement à l'air libre.

Après le refroidissement, on démoule les pièces.



### Photos 15 : produit fini



### Photos 16 : Echantillon des produits dans un moule 50x50x50 mm

#### VI.3. Essai de caractérisation : essai à la compression

Les matériaux ci-dessus (photos 16) sont prêtent pour le test de l'écrasement. Le test se fait sur la presse hydraulique et soumet progressivement à une charge jusqu'à la rupture par compression.

### Photos 17 : Appareil de compresseur



On a obtenu les résultats sur cette machine comme suit :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

Avec :

- ✚  $R_c$ : Résistance à la compression en MPa
- ✚  $F$  : Force appliquée au corps en N
- ✚  $S$  : Section de l'éprouvette en  $\text{mm}^2$

Après on a les résultats des essais de compression en f° de la teneur en déchets minéraux

Or

- $F$  s'exprime sur la machine en daN (decaNewton)

$1 \text{ daN} = 10 \text{ N}$  et  $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$  ;

L'éprouvette a une section carrée de côté  $c = 50$  mm donc :

$$S = C \times C$$

Formule 3 : Section

La valeur de la section est alors :  $S = 2500 \text{ mm}^2$

Le tableau suivant montre la valeur de la résistance à la compression en fonction de la teneur en granulats.

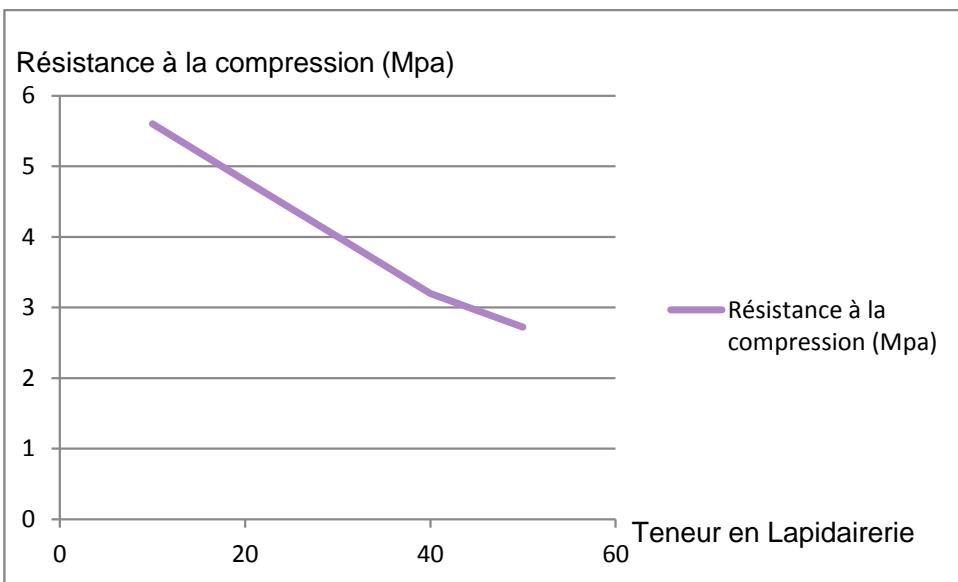
**Tableau 9: Résultats des essais de compression en fonction de la teneur en déchets minéraux**

| Essai | Teneur en déchets minéraux en %<br>Formulation (DP/Pl) | Résistance à la compression (MPa) |
|-------|--|-----------------------------------|
| N°1   | 10/90  | 5,6                               |
| N°2   | 20/80  | 4,8                               |
| N°3   | 30/70  | 4                                 |
| N°4   | 35/65  | 3,6                               |
| N°5   | 40/60  | 3,2                               |
| N°6   | 50/50  | 2,72                              |

**Interprétation :**

- Si le teneur des déchets de lapidairerie augmente, la résistance à la compression diminue, c'est le cas de l'essai n°2. Par conséquent, le matériau devient plus fragile.

- L'essai n°6 a la valeur maximale de la résistance à la compression de 5,6 MPa. Ce qui signifie que son comportement est bon avec 10% de la teneur en déchets minéraux.



**Figure 8 : Variation de la résistance à la compression du mélange de lapidairerie et le PET en fonction de la teneur en déchets minéraux**

**Remarque :**

D'après cette figure 8, on a remarqué que la résistance à la compression dépend entièrement de la quantité des déchets de lapidairerie. Dans le cas où la teneur de ces derniers est augmentée, le mélange ne supporte pas la compression et ne s'adhère pas avec les plastiques.

# **Chapitre VII : ETUDES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**

## **VII.1. Introduction**

L'avenir à long terme des conditions de vie sur notre planète concerne tous les peuples. Les États, les collectivités territoriales, les entreprises et les citoyens sont tous impliqués dans ce débat. La protection de l'environnement est une condition impérative pour permettre d'assurer une croissance soutenue et une meilleure qualité de la vie à tous les peuples de la Terre. Le siècle de la prise en compte des grands problèmes écologiques, comme l'effet de serre, sera celui de l'industrie verte.

De notre niveau, on nous a appris à l'école la notion de développement durable. Ainsi, toute initiative pour la conception et la fabrication des matériaux nouveaux doivent s'aligner autant que possible à l'idée générale d'écoconception : matériau respectant la société, son avenir et son environnement.

La récupération des déchets de lapidairerie ainsi que des déchets plastiques contribuent amplement au respect du développement durable.

## **VII.2. Les impacts positifs**

Les collectes des bouteilles en PET diminuent les déchets, qui ne cessent d'augmenter à cause de la production des différentes sociétés de consommation.

Nous avons choisi le PET comme matrice et les déchets de lapidairies en tant que renfort pour obtenir un matériau composite car la molécule de PET n'est constituée que d'oxygène, d'hydrogène et de carbone. Lors de sa combustion, seuls de l'eau ( $H_2O$ ) et du dioxygène de carbone ( $CO_2$ ) sont libérés. Ainsi, on peut dire que l'incinération du PET est donc sans danger. [A]

Si le produit présente un défaut technique, on pourrait le recycler en gardant son dosage. C'est un phénomène réversible car le plastique appliqué est un thermoplastique.

Les apports bénéfiques environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de protéger la nature et d'économiser les matières premières (non renouvelables).

### **VII.3. Les impacts négatifs**

Pour certains types de produits, les odeurs de la combustion de ces bouteilles plastiques en PET provoquent la pollution, si on n'envisage pas l'utilisation de cheminées adéquates.

## CONCLUSION

Aux termes de notre analyse, la valorisation artisanale des déchets des deux matières premières donne un produit ayant des propriétés mécaniques assez élevées et il est rentable économiquement. Plusieurs avantages sont apportés par les valorisations des déchets plastiques et lapidairies comme les réductions de volume de déchets, création d'emploi, création d'un nouveau produit.

D'après la première partie et la deuxième partie, nous avons pu exposer les études bibliographiques concernant la généralité des valorisations des déchets, puis on fait l'étude pratique et l'impact environnemental pour avoir les produits finis dans la partie 2.

Voici les formulations que nous recommandons :

- La composition du mélange pour la fabrication de brique est de 30% de déchets de lapidairerie et 70% de plastique.
- La composition du mélange nécessaire pour la fabrication de pavé est de 20% de lapidaire et 80% de plastique. Ces formulations peuvent-être encore variées si on utilise pour les manipulations des machines et appareillages adéquat.

## BIBLIOGRAPHIES

- [1] **LACROIX** Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences Professeur au muséum national d'Histoire naturelle Editions de la REVUE POLITIQUE ET LITTERAIRE (Revue Bleue) et de la REVUE SCIENTIFIQUE 286, Boulevard Saint-Germain, PARIS (VIIè).
- [2] **Michel CHATAIN** : Ingénieur de l'Institut Industriel du Nord (IDN), Docteur ès sciences physiques ; Directeur du traité Plastiques et Composites.
- [3] **Par Sándor FÜZESSÉRY** : Docteur-ingénieur, Ingénieur-conseil
- [4] **TSALOMAHARISON Nedlo Olivier** « Essai de fabrication de béton à base de déchets de bouteilles en plastique et de ciment portland » Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Science des Matériaux et Métallurgie de Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2012.
- [5] **RAHARIMAMPIONONA Soloarivao Jaonaritiana** « Contribution à l'étude de recyclage artisanal de déchet de bouteilles en plastique dans la commune urbaine d'Antananarivo » Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Science des Matériaux et Métallurgie de Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (Année universitaire 2006 - 2007).
- [6] **Pr. RANAIVONIARIIVO Velomanantsoa Gabriely** « Généralités sur les matériaux composites » Département Science des matériaux et métallurgie de l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo (année 2014).
- [7] **RASOATAHINJANAHARY Harivola** « cour Généralités sur les matériaux composites 2ème année SIM » Département Science des matériaux et métallurgie de l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo (Année universitaire 2014 - 2016).
- [8] **Khalil KHALIFA** DEA Géosciences de l'Environnement Chercheur au Centre d'économie et d'éthique pour l'environnement et le développement (C3ED) de l'université de Versailles/St-Quentin-en-Yvelines

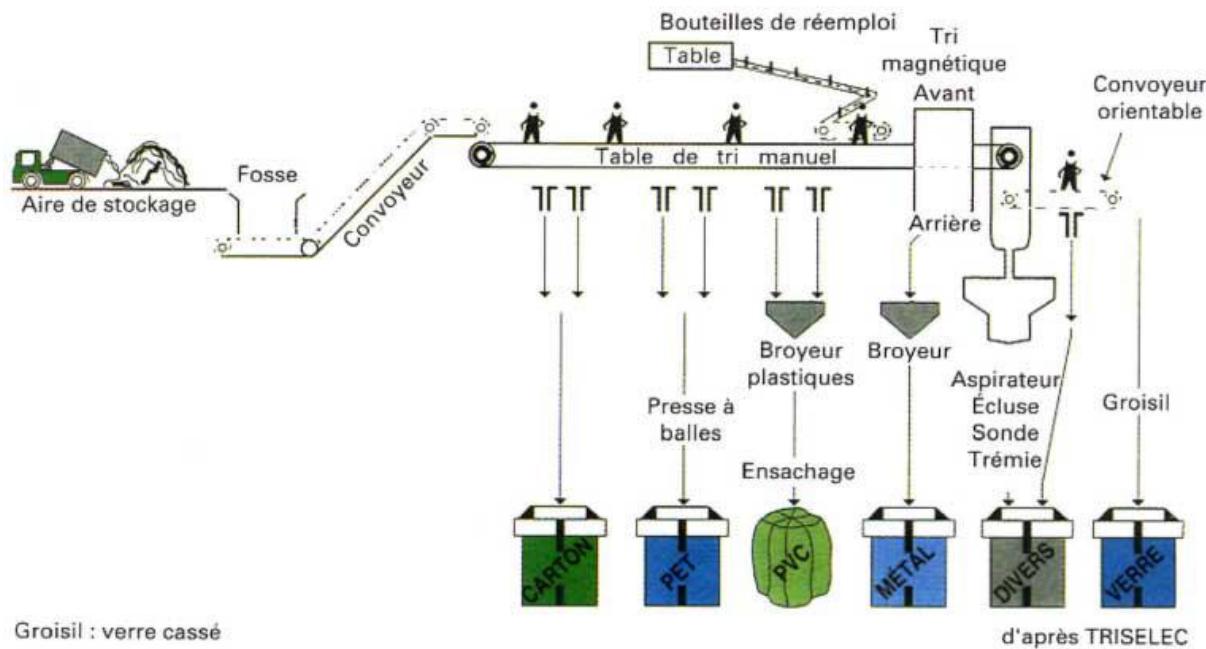
## WEBOGRAPHIES

[A] <http://www.strid.ch/pdf/pet.pdf> consulté le 03/01/17

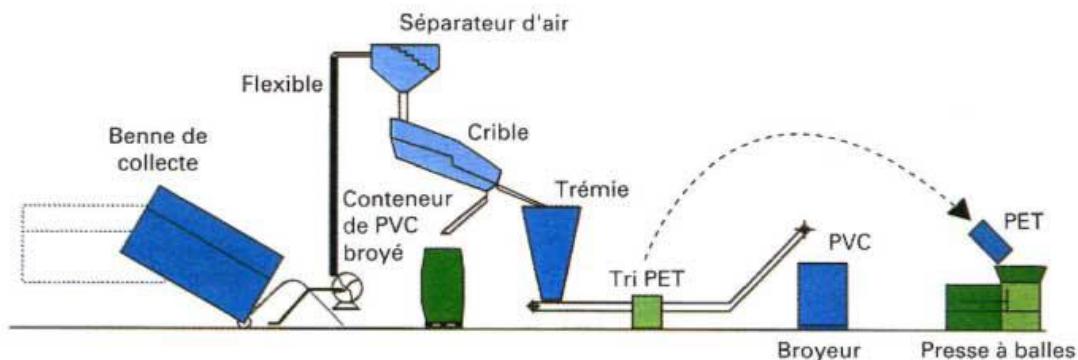
[B] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre\\_precieuse](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pierre_precieuse) consulté le 05/03/14

## **ANNEXES**

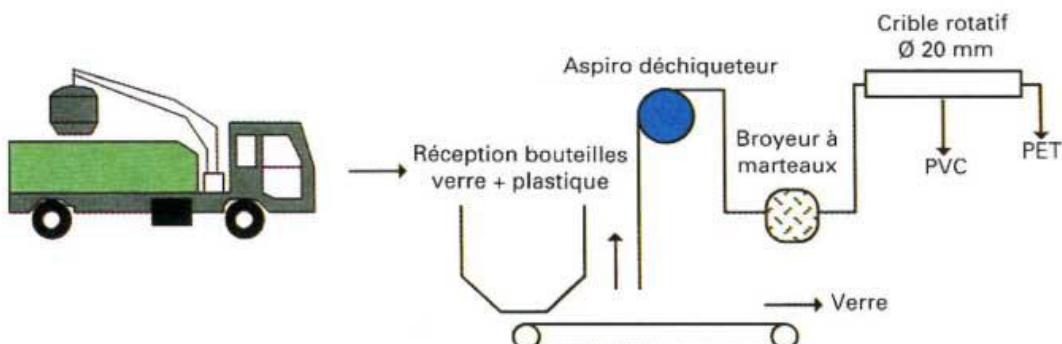
## ANNEXE I



a bouteilles non broyées en vrac

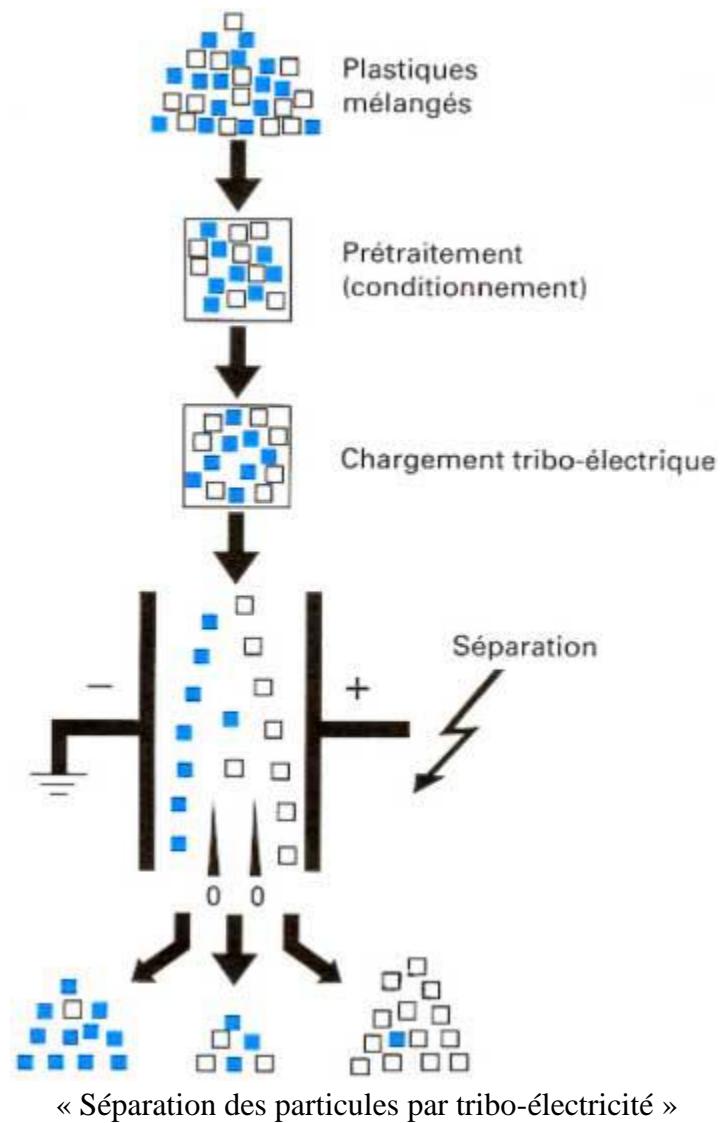


b bouteilles collectées par aspiribroyeur

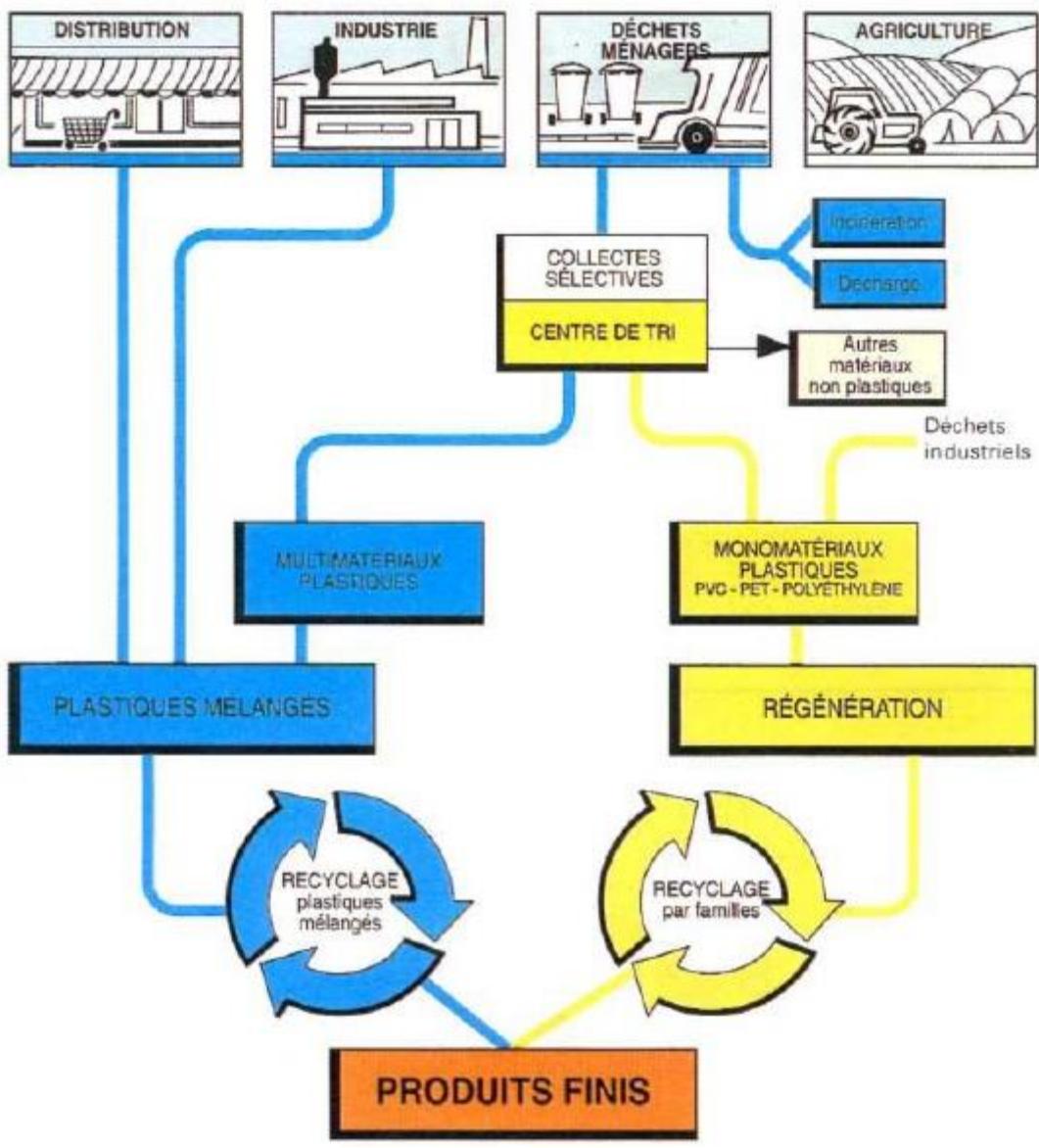


c bouteilles collectées par un véhicule équipé d'un ensemble compact de broyage  
« Tri des bouteilles en plastique collectées spécifiquement »

## ANNEXE II



### ANNEXE III



## Table des matières

|   |     |
|---|-----|
| REMERCIEMENTS .....   | I   |
| SOMAIRE.....  | II  |
| LISTE DES FIGURES.....  | III |
| LISTE DES TABLEAUX .....  | IV  |
| LISTE DES PHOTOS.....   | V   |
| LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS .....                                 | VI  |
| INTRODUCTION .....  | 1   |
| PREMIERE PARTIE : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES .....                           | 2   |
| Chapitre I : GENERALITES SUR LES RESSOURCES MINERALES DE MADAGASCAR ..... | 3   |
| I-1 : Historique .....  | 3   |
| I-2 Mode de gisement .....  | 3   |
| I-2.1 Gisements en place [2].....   | 3   |
| I-2.2 Eluvions .....  | 3   |
| I-2.3 Alluvions .....   | 3   |
| I-2.4 Mode d'exploitation.....  | 4   |
| I-3 Pierres d'ornementation et d'industrie .....                          | 4   |
| I.4.Quelques informations sur la lapidairerie à Madagascar .....          | 4   |
| Chapitre II : GENERALITES SUR LES POLYMERES .....                         | 5   |
| II.1. Introduction [3] .....  | 5   |
| II.2. Monographie du PET « Polyéthylène téréphthalate » .....             | 5   |
| II.2.1. Introduction.....   | 5   |
| II.2.2. Synthèse chimique des polymères [4].....                          | 6   |
| II.2.3. Mise en œuvre.....  | 7   |
| II.2.4. Propriétés .....  | 9   |
| II.2.5. Applications .....  | 12  |
| II.3. Les déchets plastiques.....   | 12  |
| III.3.1. Règlementation [6].....  | 12  |
| III.3.2. Types.....   | 14  |
| III.3.3. Valorisations des déchets.....                                   | 15  |
| a- La valorisation matière .....  | 15  |
| b- La valorisation énergétique.....                                       | 15  |
| c- La valorisation chimique .....   | 15  |
| Chapitre III : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.....              | 16  |
| III.1. Introduction [6] .....   | 16  |

|  |    |
|--|----|
| III.2. Principaux constituants .....   | 16 |
| III.2.1. Matrices.....   | 16 |
| a- Matrices thermoplastiques .....   | 17 |
| b- Matrices thermodurcissable .....  | 18 |
| III.2.2. Renforts .....  | 18 |
| a.    Natures des renforts.....  | 18 |
| b.    Architectures de renforts .....  | 18 |
| III.2. Les charges [8] .....   | 18 |
| III.3. Méthodes de mise en œuvre spécifiques .....                                   | 19 |
| III.4. Domaines d'application des MC.....  | 20 |
| DEUXIEME PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES .....                                     | 21 |
| Chapitre IV : ENQUETE AUPRES DE LA LAPIDAIRERIE ANTSIRABE ( cercle la MESS) .....    | 22 |
| IV.1. Extraction .....   | 22 |
| IV.2. Classification et analyse .....  | 22 |
| IV.3. Préparation .....  | 24 |
| IV.3.1. Etapes de taillage sur la machine.....                                       | 24 |
| a.    Premièrement : Préparation de la matière première : .....                      | 24 |
| b.    Deuxièmement : mise en forme.....  | 24 |
| c.    Troisièmement : Près-polissage .....   | 25 |
| d.    Quatrièmement : Polissage final et finition .....                              | 26 |
| IV.4. Produits finis.....  | 27 |
| Chapitre V : IDENTIFICATION DES MATIERES PREMIERES.....                              | 28 |
| V.1. Les déchets de PET .....  | 28 |
| V.1.1. Collecte et tri des déchets.....  | 28 |
| V.1.2. Traitements des déchets de PET .....  | 28 |
| a.    Nettoyage ou lavage :.....   | 28 |
| b.    Séchage :.....   | 28 |
| c.    Déchiquetage :.....  | 28 |
| V.1.3. Rappel des caractéristiques de PET.....                                       | 29 |
| V.2. Lapidairerie.....   | 30 |
| V.2.1. Processus du traitement .....   | 30 |
| a.    Zone de prélèvement des déchets : .....  | 30 |
| V.2.2. Broyage .....   | 31 |
| V.2.3. Granulométrie .....   | 31 |
| Chapitre VI : FABRICATION DE MATERIAU COMPOSITE « PET-DECHETS DE LAPIDAIRERIE »..... | 34 |
| VI.1. Introduction .....   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| VI.2. Formulation.....  | 35 |
| VI.2.1. Pesage .....  | 35 |
| VI.2.2. Chauffage et mélangeage .....                         | 36 |
| VI.2.3. Moulage et compactage .....                           | 36 |
| VI.2.4. Démoulage .....                                       | 37 |
| VI.3. Essai de caractérisation : essai à la compression ..... | 38 |
| Chapitre VII : ETUDES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX .....        | 42 |
| VII.1. Introduction .....                                     | 42 |
| VII.2. Les impacts positifs .....                             | 42 |
| VII.3. Les impacts négatifs .....                             | 43 |
| CONCLUSION .....  | 44 |
| BIBLIOGRAPHIES .....  | A  |
| WEBOGRAPHIES .....  | B  |
| ANNEXES.....  | C  |
| ANNEXE I.....   | D  |
| ANNEXE II.....  | E  |
| ANNEXE III.....   | F  |