



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Automatisme et instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance en Automatisme et instrumentation

Thème

L'optimisation de la production de Polyéthylène haute densité PEHD à partir de produits

Présenté et soutenu publiquement par :

Yakhou Yousra & Bensalem Nor El Houda

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
	Pr.	IMSI	Président
Mr. Bachir Bachir Bouiadjra	MCA	IMSI	Encadrant
	MCA	IMSI	Examineur
	Ing.		Représentant Partenaire Socio-économique

Année 2025/2026



Optimisation de production de PEHD

RESUME :

Ce mémoire traite de l'étude du polyéthylène haute densité recyclé (rPEHD), avec un accent particulier sur son processus de recyclage, ses caractéristiques mécaniques et l'amélioration de ses performances grâce à des analyses numériques et expérimentales.

Tout d'abord, une recherche documentaire a été menée pour expliquer les caractéristiques essentielles du polyéthylène haute densité (PEHD), notamment sa composition moléculaire, ses qualités physiques, chimiques et mécaniques, ainsi que ses utilisations principales dans l'industrie. L'analyse a également montré les différents types de PEHD, les domaines où ils sont utilisés et les méthodes de transformation qui leur sont liées. Les différentes méthodes de recyclage ont été analysées, en mettant particulièrement l'accent sur le recyclage mécanique, qui est vu comme la méthode la plus courante pour transformer le PEHD. Cette étude a démontré que la qualité des performances du matériau recyclé dépend beaucoup de la bonne réalisation du tri, de la présence de substances indésirables et des effets de vieillissement qui se produisent pendant les différentes étapes de transformation.

Ensuite, le mémoire examine la chaîne de production du rPEHD, en partant de la collecte des déchets jusqu'à la fabrication des granulés recyclés. Les différentes étapes du processus – collecte, tri, broyage, lavage, séchage, extrusion et granulation – ont été analysées pour trouver les paramètres qui peuvent influencer la qualité du matériau recyclé. Cette analyse a mis en lumière les principaux moyens d'améliorer le processus ainsi que les limites techniques dues à la diversité des déchets plastiques.

Enfin, une étude basée sur la modélisation et l'optimisation a été réalisée sur les grains de PEHD pour analyser l'effet de divers paramètres sur leur comportement mécanique lors des essais de traction et de compression. Les résultats obtenus grâce aux diagrammes de contours ont permis de mieux comprendre comment la taille des grains et les traitements utilisés influencent les contraintes mécaniques. Les études ont révélé que ces paramètres ont un grand impact sur les tensions présentes dans le matériau et qu'on peut déterminer des zones de fonctionnement avantageuses pour améliorer les propriétés mécaniques du rPEHD.

Les travaux effectués montrent clairement que le recyclage du PEHD est utile dans une approche d'économie circulaire et met en avant l'importance de mieux optimiser les méthodes de transformation pour garder les bonnes caractéristiques mécaniques du matériau recyclé.

HDPE production optimization

ABSTRACT:

This thesis focuses on the study of recycled high-density polyethylene (rHDPE), with an emphasis on its recycling process, its mechanical properties, and the optimization of its performance through numerical and experimental analyses.

Initially, a literature review was conducted to present the fundamental characteristics of high-density polyethylene (HDPE), including its molecular structure, physical, chemical, and mechanical properties, as well as its main industrial applications. The analysis also highlighted the different types of HDPE, their areas of use, and the associated processing methods. The various recycling streams were examined, with a particular focus on mechanical recycling, considered the most widespread method for HDPE recovery. This study demonstrated that the performance of the recycled material is strongly influenced by the quality of sorting, the presence of contaminants, and the degradation processes occurring during processing cycles.

In a second phase, the thesis analyzes the rHDPE production chain from waste collection to the production of recycled pellets. The various stages of the process—collection, sorting, grinding, washing, drying, extrusion, and pelletization—were examined to identify the parameters likely to affect the final quality of the recycled material. This analysis highlighted the main levi

تحسين انتاج البولي ايثيلين عالي الكثافة

ملخص:

تتناول هذه المذكرة دراسة البولي إيثيلين عالي الكثافة المعاد تدويره مع التركيز بشكل خاص على عملية إعادة تدويره وخصائصه الميكانيكية وتحسين أدائه من خلال التحليلات العددية والتجريبية.

، بما في ذلك (PEHD) في البداية، تم إجراء بحث موثق لشرح الخصائص الأساسية للبولي إيثيلين عالي الكثافة تركيبته الجزيئية، وخصائصه الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية، بالإضافة إلى استخداماته الرئيسية في الصناعة. والمجالات التي يتم استخدامها فيها، وطرق المعالجة المرتبطة PEHD كما أظهر التحليل الأنواع المختلفة من بها. تم تحليل طرق إعادة التدوير المختلفة، مع التركيز بشكل خاص على إعادة التدوير الميكانيكي، الذي يُعتبر الطريقة الأكثر شيوعاً لتحويل البولي إيثيلين عالي الكثافة. أظهرت هذه الدراسة أن جودة أداء المادة المعاد تدويرها تعتمد بشكل كبير على صحة عملية الفرز، ووجود المواد غير المرغوب فيها، وتأثيرات الشخوخة التي تحدث خلال مراحل التحويل المختلفة.

، بدءاً من جمع (rPEHD) بعد ذلك، تتناول الأطروحة سلسلة إنتاج البولي إيثيلين عالي الكثافة المعاد تدويره النفايات وحتى تصنيع الحبيبات المعاد تدويرها. تم تحليل المراحل المختلفة للعملية – الجمع، والفرز، والطن، والغسل، والتجفيف، والبتق، والتحبیب – لتحديد المعلمات التي يمكن أن تؤثر على جودة المادة المعاد تدويرها.

REMERCIEMENT

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons d'abord à exprimer nos reconnaissances et nos remerciements

à nos parents pour leur encouragement et leur soutien moral et matériel indispensable tout au long de ces années.

Un grand merci à nôtres frères et sœurs

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur **Dr. Bachir Bachir Bouiadjra** qui a bien voulu diriger et encadré ce travail, avec beaucoup de compétence, intérêt, disponibilité et de patience

Nous exprimons nos reconnaissances au Président et aux membres du jury qui ont bien voulu examiner ce travail.

Un merci à tous ceux dont nous n'avons pas cité, qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Nous remercions toute personne qui nous a aidées de près comme de loin pour réaliser ce travail.

DEDICACE

: e didie ce mémoire :

J

Grâce à Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la force pour réaliser ce mémoire.

Je dédie ce travail à :

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la
Responsabilité...merci Ma MERE.

A celui qui a été toujours la source d'inscription et
de courage ...merci Mon Père Ahmed

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père
Snouci bien aime, qui restera a jamais dans mon
cœur. Son amour, ses sacrifices et ses
encouragements mont accompagne tout au long de
mon parcours qu'Allah lui accorde sa miséricorde
et l'accueille dans son vaste paradis *ابي سنوسي رحمة
الله عليه*

A mes frères (Ayoub, youcef, Moayad et mohamed)
et mes sœurs (Insaf Sanaa et Amani)

A toute ma famille.

A mon marie Mohamed et ma belle-famille
Laoudjane

A mes amies sans exception.

YOUSSRA ET HOUDA

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	v
DEDICACE	v
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES ABREVIATIONS	xiv
LISTE DES SYMBOLES.....	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART ET CADRE THEORIQUE.....	3
I.1 Introduction	4
I.2 Généralités sur le polyéthylène PE	4
I.2.1 Historique de Polyéthylène	4
I.2.2 Le polyéthylène	5
I.2.3 structure de polyéthylènes	6
I.2.4 Propriété de polyéthylènes.....	7
I.2.5 Les types de polyéthylènes	7
I.3 Généralités sur Le polyéthylène haute densité (PEHD).....	9
I.3.1 Définition sur Le polyéthylène haute densité (PEHD)	9
I.3.3 Caractéristiques du de polyéthylènes haute densité (PEHD)	10
I.3.4 Structure de polyéthylène haute densité (PEHD).....	10
I.3.5 Propriété de polyéthylènes haute densité (PEHD)	11
I.3.6 Les types de polyéthylènes haute densité (PEHD).....	11
I.3.7 Les applications du Polyéthylène à haute Densité (PEHD)	12
I.3.8 Comparaison entre PEHD 500 et PEHD 1000 et Ses Applications	12
I.3.9 Les avantages et les inconvénients du polyéthylène à haute densité (PEHD)	14
I.4 Procédés de mise en œuvre	14
I.5 La filière de recyclage des plastiques.....	15

I.5.1	Processus de recyclage	15
I.5.2	Typologie des déchets PEHD (post-consommation, post-industriel)	15
I.5.3	Déchets PEHD Post-Industriels (Pré-consommation).....	16
I.5.4	Déchets PEHD Post-Consommation (PCR).....	17
I.5.5	Différences qualité recyclage PEHD post-consommation vs post-industriel	17
I.6	Les différentes voies de recyclage	18
I.6.1	Recyclage chimique	18
I.6.2	Recyclage mécanique.....	20
I.6.3	Les étapes clés du processus	21
I.6.4	Les Avantages et inconvénients du recyclage mécanique PEHD	21
I.6.5	Dissolution (recyclage physique).....	22
I.7	Les différentes voies de recyclage	22
I.7.1	Dépolymérisation et réaction dégradation	23
I.7.2	contaminats	23
I.7.3	variabilité et contrôle qualité.....	23
I.8	Conclusion	23
CHAPITRE II :	Analyse de la chaine de production du rPEHD et Points d'optimisation	24
II.1	Introduction.....	25
II.2	collecte et tri.....	25
II.2.1	la collecte.....	25
II.2.2	le tri	26
II.2.3	le tri amont.....	27
II.2.4	Classification de Tri.....	28
II.2.5	Les types de tri	28
II.2.6	Les avantages de tri automatique :.....	31
II.3	Impact de la qualité du tri (automatique vs manuel) sur la pureté du flux PEHD	31
II.3.1	Impact de la qualité du tri manuel sur pureté de flux :.....	33
II.3.2	Les inconvénients :.....	33
II.3.3	Impact de la qualité du tri automatique sur pureté de flux :.....	33
II.4	Pistes d'optimisation : technologies de tri et sensibilisation des consignes de tri	35
II.4.1	Les technologies de tri avancées :.....	35
II.4.2	Sensibilisation aux consignes de tri :.....	36
II.5	Prétraitement et nettoyage :.....	37
II.6.1	températures de lavage :	41
II.6.2	Efficacité des agents de lavage :.....	42
II.7	Conclusion	43
III.1	Introduction	45
III.2	Test de compression	49
II.5	Conclusion	57

CHAPITRE IV : Optimisation numérique.....	59
IV.1 Introduction	60
□ Génération de matrices de plans d'expériences	61
□ Modélisation mathématique et régression	62
□ Analyse de la variance et diagnostic (ANOVA).....	62
IV.6 Explications des paramètres	64
IV.7 Analyse des résultats	64
IV.8 Analyse et optimisation de diagramme de contour:	67
IV.8.1 Analyse via les contours :.....	67
IV.8.2: Optimisation à partir des contours :	67
IV.8.3 Exemple :	68
IV.8.4 Avantages :	68
IV.8.5 Avantages :	63
IV.8.6 Optimisation :	69
IV.9 Analyse et optimisation de diagramme de contour de compression :.....	70
IV.9.1 Contours et couleurs :	70
IV.9.2 Tendances observées :	71
IV.9.3 Interprétation technique et Optimisation :	71
IV.9.4 Effet combine	71
IV.9.5 Conclusion :.....	66
IV.10 Analyse et optimisation de diagramme de contour de Traction :	72
IV.10.1 Contours et couleurs.....	72
IV.10.2 Tendances observées :	73
IV.10.3 Interprétation technique et Optimisation :	73
IV.10.4 Effet combine	73
IV.10.5 Conclusion	74
CONCLUSION GENERALE	75
BIBLIOGRAPHIE.....	77
Annexes	73
1. Annex A : TITRE D'ANNEXE A.....	74

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: représente historique de polyéthylène	5
Figure I.2: représente la formule de PE	6
Figure I.3: polymérisation de polyéthylène	6
Figure I.4: Schéma semi-développé illustrant la structure macromoléculaire de polyéthylène	7
Figure I.5: représente la comparaison des densités des PEHD et PEBD	8
Figure I.6: représente Le PEHD granulés	9
Figure I.7 : représente le PEHD poudres	9
Figure I.8 : représente la comparaison du PE 500 vs PE 1000	13
Figure I.9: typologie des déchets PEHD.....	15
Figure I.10: pyrolysuer de plastique.....	18
Figure I.11: représente méthode de L'hydrogénation	209
Figure I.12: Calendrier de réalisation du projet	19
Figure II.1: collecte des déchets.....	26
Figure I.2: Opération de collecte globale.....	26
Figure II.3: Schéma explicatif du tri sélectif à la source.....	26
Figure II.4: Tri sélectif multi-matériaux.....	26
Figure I.5: Le tri des déchets en amont au niveau ménager.....	27
Figure II.6: opération de tri.....	28
FigureII.7: grande table de tri manuelle.....	28
Figure II.8: représente le tri des plastiques.....	28
Figure II.9: plate-forme de tri manuelle.....	28
Figure II.10: tri des emballages.....	28
Figure II.11: table de tri manuelle.....	28
Figure II.12: opération de tri mécanique.....	29
Figure II.13: machine de tri mécanique.....	29
Figure II.14: table de tri mécanique.....	29
Figure II.15: système de tri mécanique.....	29
Figure II.16: système de tri automatique.....	30
Figure II.17: ligne de tri automatique.....	30
Figure II.18: machine de tri automatique.....	30
Figure II.19 : Impact de qualité de tri sur le flux.....	33
Figure II.21 : système de tri NIR.....	34
Figure II.22: broyeur de plastique.....	36
Figure II.23: broyeur de recyclage.....	36
Figure II.24: broyeur de tuyaux.....	36
Figure II.25: représente ligne de lavage.....	37
Figure II.26: séparateur densimétrique	38
Figure II.27: table de densimétrie.....	38
Figure II.28: système Séchage	39
Figure II.29: sécheur à mélange verticale.....	39
Figure III.1: Machine de compression.....	46
Figure III.2 : Servohydraulic Machine.....	47
Figure III.3: Comparaison entre un échantillon non traité thermiquement et un échantillon traité à l'huile soumis à une contrainte de compression.....	48
Figure III.4: Comparaison entre un échantillon non traité thermiquement et un échantillon traité à l'eau soumis à une contrainte de compression.....	49
Figure III.5: Comparaison entre un échantillon traité thermiquement à l'eau et un échantillon traité à l'huile soumis à une contrainte de compression.....	50

Figure III.6: Effet de la taille des graines sur les échantillons soumis à une contrainte de compression.....	51
Figure III.7: Effet du traitement thermique sur des échantillons soumis à une contrainte de traction	52
Figure III.8: Effet de la taille des graines sur des échantillons soumis à une contrainte de traction..	53
Figure IV.1 : Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du traitement et de la dimension des particules.....	61
Figure IV.2 : Modélisation par surface de réponse du [Variable] en fonction des conditions de traitement et de la taille.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 représente les propriétés du PE .	7
Tableau I.2 représente les types du PEHD	8
Tableau I.3 représente les propriétés du PEHD	11
Tableau I.4 les avantages et les inconvénients	13
Tableau I.5 représente la deffirance entre recyclage mécanique et chimique	14
Tableau I.6 tae yuus 2	18
Tableau II.1 représente La classification de tri avant et après la collecte	287
Tableau II.2 représente impact de tri sur la pureté	32
Tableau II.3 représente optimisation des paramètres	40
Table IV.1 Matrice de l'analyse expérimentale et résultats des essais de traction et de compression	57
Tableau IV.2 : Résultats de l'optimisation numérique multicritère et recherche des conditions optimales sous MODD	58
Tableau IV.3 : Coefficients de régression et indicateurs de performance du modèle pour la contrainte de comparaison maximale	59
Tableau IV.4 : Coefficients de régression et indicateurs de performance du modèle pour la contrainte de traction maximale	60

LISTE DES ABREVIATIONS

PEHD : polyéthylène haute densité.

PE : polyéthylène.

PE-BD : polyéthylène basse densité.

PE-LBD : polyéthylène à basse densité linéaire.

PE-HD : polyéthylène à haute densité.

PE-UHMW : polyéthylène à masse molaire élevée.

PE-R : polyéthylène recyclé.

PE-RHD : polyéthylène recyclé à haute densité.

PE-MD : polyéthylène à moyenne densité.

PE-TBD : polyéthylène à très basse densité.

Siz : size.

Tre : traitement.

PET : Polyéthylène Téréphtalate.

PP : Polypropylène.

PS : Polystyrène.

PIR : Recyclé Post-Industriel.

PCR : Recyclé Post-Consommation.

NIR : Near Infrared (Proche Infrarouge).

INTRODUCTION GENERALE

Les polymères les plus couramment utilisés à travers le monde grâce à leurs qualités exceptionnelles comme leur rigidité, leur résistance mécanique, leur stabilité chimique et leur facilité à transformation grâce à ces propriétés. Il est utilisé dans beaucoup de secteurs industriels, comme la fabrication de différents types de boîtes rigides, de bouteilles opaques, de flacons, de tubes et de plusieurs produits techniques.

Cependant, la forte augmentation de la fabrication et de l'utilisation des plastiques au fil des dernières décennies a entraîné une accumulation importante de déchets, ce qui représente aujourd'hui un grand défi pour l'environnement. La prise en charge de ces déchets en plastique constitue un problème majeur à l'échelle mondiale, car ils se dégradent lentement et nuisent à l'environnement. Dans ce contexte, le recyclage des plastiques, notamment du PEHD, devient une solution essentielle pour diminuer la pollution, protéger les ressources naturelles et favoriser une économie circulaire durable.

Parmi les diverses méthodes pour valoriser le PEHD, le recyclage mécanique demeure la méthode la plus répandue car il est facile à mettre en place et coûte peu. Ce procédé consiste à transformer les déchets secondaires qui peuvent être réintroduits dans le cycle de production. Toutefois, même si le recyclage mécanique a ses bénéfices, il a aussi des points faibles. Par exemple, le matériau perd petit à petit ses qualités grâce aux chaleurs et aux pressions qu'il subit. De plus, il peut y avoir des impuretés comme des restes de produits chimiques, des collants ou d'autres types de plastiques qui ne vont pas bien ensemble. Enfin, la matière que l'on récupère après que les gens ont utilisé les produits varie beaucoup, ce qui rend difficile la création d'un plastique recyclé de bonne qualité chaque fois. Cette diversité affecte directement les caractéristiques du PEHD recyclé (rPEHD), ce qui nécessite un meilleur contrôle des différentes phases du processus de recyclage. Dans ce sens, l'amélioration de la fabrication du rPEHD constitue un défi important à la fois pour la science et l'industrie.

Cela suppose une analyse détaillée de toute la chaîne de production, depuis la collecte et le tri des déchets jusqu'aux différentes étapes de prétraitement, de nettoyage, d'extrusion et de reconditionnement. L'amélioration de la qualité du matériau recyclé dépend aussi de l'ajustement des conditions de fabrication, ainsi que de l'ajout de substances spéciales comme les stabilisants, les compatibilisants et les agents de traitement, qui aident à compenser les effets de dégradation et à rendre le produit final plus performant.

Ce mémoire est structuré en 4 chapitres principales.

- ✓ Le chapitre 1 traite de l'étude de l'art et du cadre théorique.
- ✓ Le chapitre 2 analyse la chaîne de production ainsi que les points possibles d'optimisation.
- ✓ Le chapitre 3 présente les méthodes expérimentales utilisées et les résultats obtenus.
- ✓ Le chapitre 4 consacrée à l'optimisation numérique du processus.
- ✓ Enfin, une conclusion est présentée avec quelques perspectives.

CHAPITRE I : ETAT DE

L'ART ET CADRE

THEORIQUE

I.1 Introduction

L'étude scientifique et l'optimisation industrielle du recyclage du polyéthylène haute densité (PEHD) exigent, au préalable, une compréhension rigoureuse des fondements théoriques qui régissent la science des polymères. En tant que matériau synthétique semi-cristallin, le PEHD possède des caractéristiques macromoléculaires uniques — telles que sa masse molaire, son taux de cristallinité et l'agencement de ses chaînes — qui dictent directement ses propriétés macroscopiques, sa durabilité et sa résistance mécanique. Avant d'aborder les transformations physiques liées aux procédés de recyclage, il est essentiel de cerner la nature intrinsèque de ce matériau et de comprendre comment il interagit avec son environnement.

L'objectif de ce premier chapitre est de dresser un panorama complet des connaissances actuelles concernant le PEHD et les problématiques liées à sa fin de vie. Dans un premier temps, nous rappellerons l'historique, la structure chimique et les principales propriétés physiques, thermiques et mécaniques qui ont fait le succès industriel de ce polymère. Dans un second temps, nous analyserons le contexte mondial de la gestion des déchets plastiques, en explorant les différentes voies de valorisation (mécanique, chimique et thermique), tout en mettant en évidence les limites environnementales et économiques actuelles.

Enfin, nous porterons une attention particulière aux mécanismes de dégradation thermo-mécanique et photo-chimique subis par le PEHD lors de son utilisation et de son retraitement. L'analyse de ces phénomènes de vieillissement, associés à l'impact des contaminants hétérogènes (autres polymères, résidus organiques, adhésifs), nous permettra de poser les bases théoriques indispensables. Ce cadre conceptuel est nécessaire pour appréhender les défis technologiques qui seront traités dans la suite de ce travail, notamment l'analyse expérimentale de l'impact des traitements thermiques et de la granulométrie sur les performances mécaniques du matériau recyclé.

I.2 Généralités sur le polyéthylène PE

I.2.1 Historique de Polyéthylène

Le polyéthylène (PE) est l'un des matériaux synthétiques les plus couramment utilisés dans le monde. Sa découverte date de la fin du XIXe siècle. En 1898, le chimiste allemand Hans von Pechmann a accidentellement synthétisé une substance cireuse blanche lors de ses recherches sur le diazométhane. Cette substance a ensuite été reconnue comme un polymère formé de chaînes longues de $-CH_2-$.

Cependant, le développement industriel du polyéthylène (PE) a commencé seulement dans les années 1930. En 1933, les scientifiques Eric Fawcett et Reginald Gibson, qui travaillaient à la société Imperial Chemical Industries, ont trouvé une méthode pour faire durcir le polyéthylène sous une très forte pression, ce qui permettait de produire

ce matériau de façon régulière et fiable. Ce procédé a permis de créer le polyéthylène à faible densité (LDPE), qui a été mis sur le marché à partir de 1939.

Pendant la Deuxième Guerre mondiale, le polyéthylène (PE) a connu une grande progression en raison de ses très bonnes qualités d'isolation électrique, notamment pour la fabrication de câbles utilisés dans les systèmes radar.

Une grande découverte a eu lieu dans les années 1950 grâce à de nouveaux catalyseurs qui ont permis de faire polymériser l'éthylène à une pression plus faible. En 1953, le chimiste allemand Karl Ziegler a créé un système de catalyse basé sur des composés organométalliques, ce qui a permis de produire du polyéthylène à haute densité (HDPE). En même temps, d'autres catalyseurs, comme ceux créés par Phillips Petroleum, ont aussi aidé à utiliser ce matériau dans les industries.

Plus tard, l'arrivée des catalyseurs métallocènes dans les années 1970 a permis de mieux contrôler la structure des molécules du polyéthylène et de créer des types nouveaux qui possèdent des caractéristiques particulières.

Aujourd'hui, le polyéthylène est utilisé dans beaucoup de secteurs industriels comme l'emballage, la construction, l'électricité et la médecine, grâce à ses bonnes qualités mécaniques, chimiques et à la facilité avec laquelle il peut être façonné [1].

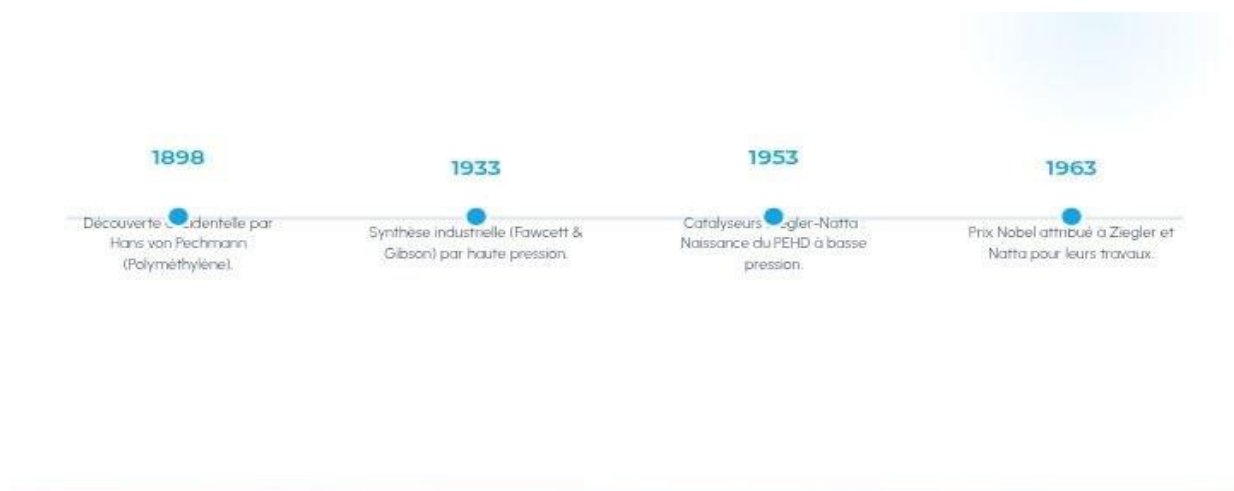


Figure I.1: représente historique de PE

I.2.2 Le polyéthylène

Le polyéthylène est un matériau qui se transforme lorsqu'on le chauffe, il appartient à la famille des polyoléfinés, et sa molécule se compose de chaînes longues de molécules d'éthylène.

Il se présente sous forme de chaînes contenant entre 1000 et 2000 monomères.

Le polyéthylène est très important car il est produit à grande échelle dans le monde entier.

L'année dépasse 100 millions de tonnes. Il existe différents types de polyéthylènes, notamment les homopolymères à basse densité (PE-BD) et à haute densité (PE-HD), ainsi que des copolymères (PE-LBD) [2].

La formule chimique du polyéthylène est : $-(CH_2 - CH_2)_n-$.

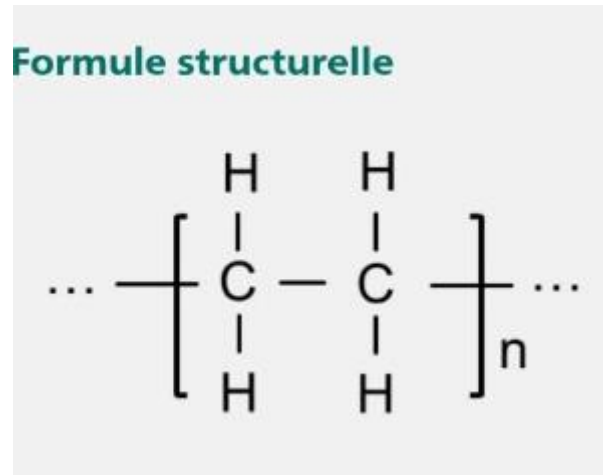


Figure I.2: représente la formule du PE

I.2.3 structure de polyéthylènes

Le polyéthylène, souvent abrégé en PE, est une résine thermoplastique qui se fabrique grâce à un processus appelé polymérisation d'éthylène. Il comprend également des copolymères d'éthylène(C_2H_4) avec une petite quantité L'alpha-oléfine permet de former des macromolécules grâce à la répétition du motif de PE est : $-(CH_2)-(CH_2)-$ [3].

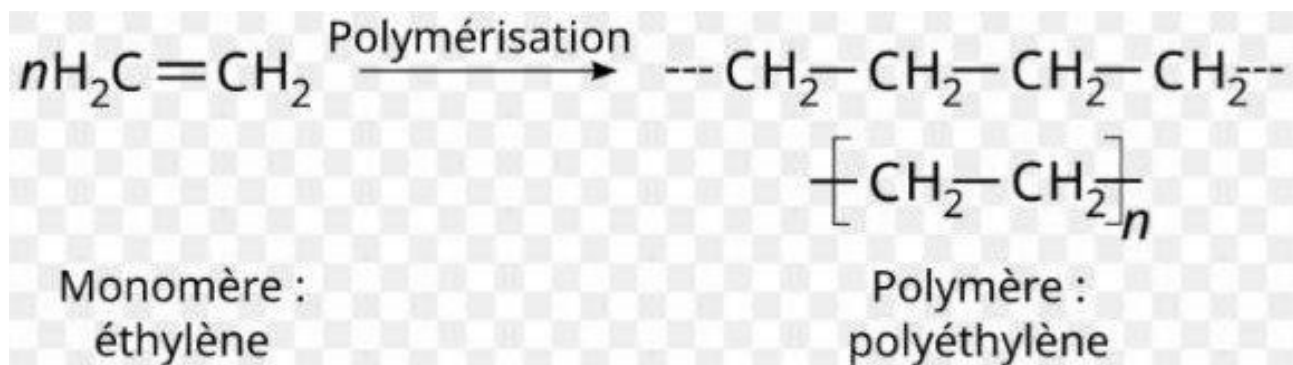


Figure I.3: polymérisation du polyéthylènes.

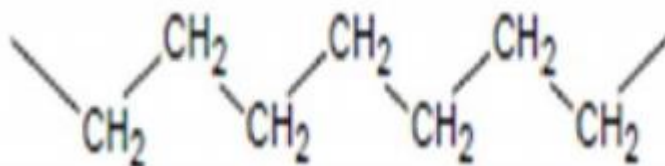


Figure I.4: Schéma semi-développé illustrant la structure macromoléculaire de polyéthylène [4].

I.2.4 Propriété de polyéthylènes

Température de transition du verre	-130° à -100°C
Température de fusion	125 à 135°C
Température de décomposition	480 à 498°C
Capacité thermique spécifique	1.8 à 2.7 J / (g*k)
densité	0.94 à 0.96 g/cm ³
Propriété générale	Meilleure résistance chimique bonnes, rigidité, dureté

Tableau I.1 représente les propriétés du PE [1] [2].

I.2.5 Les types de polyéthylènes

Les polyéthylènes sont classés selon leur densité, qui dépend du nombre et de la longueur des chaînes moléculaires

- PE-BD : polyéthylène basse densité.
- PE-LBD : polyéthylène à basse densité linéaire.
- PE-HD : polyéthylène à haute densité.
- PE-UHMW : polyéthylène à masse molaire élevée.

- PE-R : polyéthylène recyclé.
- PE-RHD : polyéthylène recyclé à haute densité.
- PE-MD : polyéthylène à moyenne densité.
- PE-TBD : polyéthylène à très basse densité.

	PEBD	PEMD	PEHD
Masse volumique (g.cm ³)	0.910 à 0.940	0.935 à 0.945	0.941 à 0.965
Cristallinité (%)	< 40	40 à 60	60 à 80
Température de fusion (°C)	105-115	-	118 à 146
Température de transtion vitreuse (°C)	-113-103	-	-120
Contrainte à la repture (MPa)	8à15	18 à 28	26 à 40
Allongement à repture (%)	150 à 100	200 à 1200	1000

Tableau I.2 représente les types du PEHD [5].

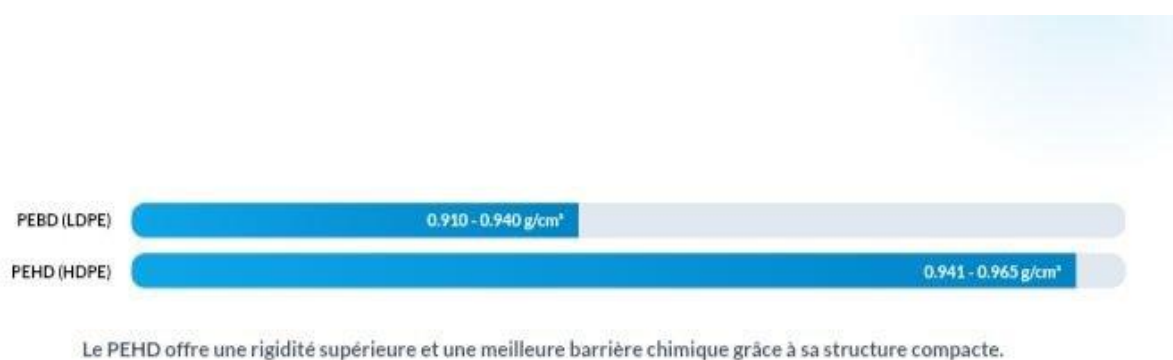


Figure I.5: représente la comparaison des densités des PEHD et PEBD.

I.3 Généralités sur Le polyéthylène haute densité (PEHD)

I.3.1 Définition sur Le polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un type de plastique qui est très solide et très utilisable dans de nombreux domaines. Les fabricants ont confiance dans le PEHD grâce à sa combinaison unique de résistance et de flexibilité.

Ce matériau s'adapte à une grande variété de produits en maille, notamment les filets agricoles et les écrans de protection.

Le PEHD est constitué de molécules très serrées, ce qui lui donne une densité plus élevée et de meilleures qualités physiques comparé aux autres polyéthylènes. Ces propriétés rendent le PEHD un matériau très apprécié pour les utilisations nécessitant une stabilité et une performance durables dans le temps [5].



Figure I.6: représente le PEHD granulé



Figure I.7: représente le PEHD poudres

I.3.2 La méthode de la synthèse du PEHD

Le PEHD est fabriqué en polymérisant le monomère d'éthylène à haute pression et à haute température en présence d'un catalyseur.

Voici les étapes de la synthèse du PEHD :

1. **Préparation des matières premières** : L'éthylène est obtenu à partir de matières premières telles que le pétrole brut ou le gaz naturel. Il est ensuite nettoyé pour enlever les impuretés.
2. **Polymérisation** : L'éthylène est introduit dans un réacteur à haute pression avec un agent de polymérisation un catalyseur, souvent du zirconium, du titane ou du

nickel, qui permet de déclencher la réaction de polymérisation. La réaction a lieu à une température d'environ 70 à 150 degrés Celsius et à une pression d'environ 10 à 80 bars. Le catalyseur permet aux molécules de se lier plus facilement. L'éthylène permet la création de longues chaînes de polymères.

3. **L'extrusion et le moulage** : le polymère fondu est poussé à travers un tube, ce qui lui donne une forme spécifique. Sa forme finale, telle que des granules ou des tubes. Le produit peut ensuite être moulé à l'aide de la machine des techniques comme l'injection, le moulage par soufflage ou le moulage par compression.
4. **Traitement** : Le PEHD peut subir divers traitements, tels que le traitement thermique, le traitement chimique, le traitement mécanique. Ces méthodes permettent d'améliorer certaines propriétés du matériau, comme sa résistance, sa ductilité ou son apparence. Le choix du traitement dépend de l'application visée et des caractéristiques requises du matériau final traitement chimique, traitement de surface ou traitement de renforcement, pour améliorer ses propriétés mécaniques et physiques [6].

I.3.3 Caractéristiques du de polyéthylènes haute densité (PEHD)

Le polyéthylène HDPE est un matériau blanc ou coloré, conforme aux normes sanitaires de l'FDA (naturel) et résistant aux produits chimiques.

Il est disponible en fini luisant ou autre, et se distingue par sa rigidité, sa facilité de soudage et ses propriétés thermoformables. Cette version de polyéthylène est appréciée pour sa stabilité et son uniformité [7].

I.3.4 Structure de polyéthylène haute densité (PEHD)

La structure chimique du polyéthylène haute densité (PE-HD) se caractérise par les points suivants :

- **Motif répétitif** : Le PE-HD a une structure moléculaire simple qui se compose de n fois le motif CH₂-CH₂.
- **Alignement des chaînes** : À l'opposé de d'autres types de polyéthylène, les groupes CH₂ sont alignés de manière linéaire, formant des chaînes aliphatiques.

Cette structure linéaire permet au matériau d'être très dense.

Origine et formation : Il est fabriqué à partir de l'éthylène grâce à un processus de polymérisation utilisant un catalyseur.

Rôle du catalyseur : Ce catalyseur, qui est un composé organométallique de type Ziegler-Natta (formé de sels de titane et d'aluminium), permet de créer cette structure particulière.

Ce catalyseur permet de relier le monomère, l'éthylène, au site actif de la molécule qui grandit autour d'un centre métallique.

Les propriétés du polymère dépendent principalement de la longueur des chaînes, c'est-à-dire du nombre de fois que le motif se répète [7].

I.3.5 Propriété de polyéthylènes haute densité (PEHD)

Le PEHD est l'un des polymères les plus utilisés industriellement en raison de ses caractéristiques exceptionnelles, qui combinent robustesse, légèreté et durabilité

Propriétés mécaniques	_ Haute résistance à la traction _ Excellente résistance aux chocs _ Bonne tenue mécanique et durabilité
Propriétés chimiques	_ Bonne résistance chimique (acides, bases, solvants faibles) _ Résistance à la corrosion _ Bonne stabilité dans les environnements agressifs
Propriétés physiques et Environnementales	_ Faible absorption d'eau (résistance à l'humidité) _ Bonne résistance aux UV et aux intempéries _ Légèreté _ Facilité de manipulation et d'installation _ Bonne stabilité dimensionnelle dans le temps

Tableau I.3 représente les propriétés de PEHD [7].

I.3.6 Les types de polyéthylènes haute densité (PEHD)

Les différents grades du PEHD :

- ❖ Le PEHD est disponible en plusieurs niveaux selon sa résistance et son utilisation.
- ❖ Le niveau de grade augmente habituellement en fonction de la résistance mécanique, chimique et à l'usure :
- ❖ PEHD 80 : flexible, résistant aux chocs, adapté aux pièces qui se déforment.

- ❖ PEHD 100 : utilisé pour les tuyauteries et les conduits soumis à une pression modérée.
- ❖ PEHD 300 : bon équilibre entre résistance et facilité d'utilisation, idéal pour les réservoirs et les conteneurs.
- ❖ PEHD 500 : Très résistant, utilisé dans les applications industrielles et marines
- ❖ PEHD 1000 : très grande résistance aux frottements et aux chocs.
- ❖ PEHD 3000 : excellente résistance aux produits chimiques, adaptée aux milieux agressifs.
- ❖ PEHD 8000 : le niveau de qualité le plus élevé pour les situations difficiles et pour une utilisation mécanique intensive [8].

I.3.7 Les applications du Polyéthylène à haute Densité (PEHD)

- Bouteilles de lait de jus : Le PEHD est utilisé pour fabriquer des bouteilles parce que

Il est solide et ne se déforme pas facilement. Il ne réagit pas avec les aliments à température normale. Il est chauffé. Cela assure la sécurité de l'eau potable.

- Contenants cosmétiques : Le PEHD est utilisé pour l'emballage des produits cosmétiques (crèmes, shampoings...) car Il résiste aux produits chimiques. Il ne réagit pas avec le contenu

→ Il préserve la qualité et l'efficacité des produits.

- Bidons et récipients : Utilisé pour les détergents, les huiles, les produits ménagers Résistance chimique solide et durable

→ adapté au stockage et au transport.

- Tuyaux : Utilisés dans les canalisations pour l'eau et le gaz.

→ Résistant à la corrosion, longue durée de vie, idéal pour les infrastructures.

- Sacs et emballages : léger et assez flexible, résistant à l'usure

→ utilisé pour l'emballage du quotidien.

- Produits recyclés : Après avoir été recyclés, les matériaux en PEHD sont utilisés pour créer : Les bacs, les tuyaux et le mobilier en plastique contribuent à la protection de l'environnement [9].

I.3.8 Comparaison entre PEHD 500 et PEHD 1000 et Ses Applications

❖ PEHD 500

Le PEHD 500 est célèbre pour sa solidité et sa capacité à résister à l'usure.

Il est fréquemment employé dans des cas d'usage industriels qui demandent une grande résistance aux chocs et une très bonne durabilité.

➤ Applications PEHD 500 :

- Tapis de convoyeur.
- Pièces de machines.
- Supports de coupe.

❖ PEHD 1000

Le PEHD 1000, qui se nomme aussi UHMWPE (Polyéthylène à Masse Molaire Très Élevée), a une résistance aux frottements et aux chocs bien plus forte que le PEHD 500.

Il convient particulièrement bien aux environnements difficiles où la friction et l'usure jouent un rôle important.

➤ Applications PEHD 1000 :

- Revêtements anti-abrasion.
- Guides de chaîne.
- Pièces de manutention [8].



Figure I.8 : représente la comparaison du PE 500 vs PE 1000 [8].

I.3.9 Les avantages et les inconvénients du polyéthylène à haute densité (PEHD)

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> _une consistance chimique stable une sécurité alimentaire assurée _une cohérence des UV _une résistance à l'humidité _une durabilité et une légèreté _une recyclabilité facilitée et une grande polyvalence. 	<ul style="list-style-type: none"> _Il devient fragile à très basse température _Il peut se déformer sous une charge importante _Sa résistance est limitée face à des produits oxydants forts _Il est moins rigide que certains autres plastiques _Son impact environnemental est lié à l'utilisation de combustibles fossiles _Le recyclage peut être limité selon les types de produits.

Tableau I.4 les avantages et les inconvénients [10].

I.4 Procédés de mise en œuvre

Une fois synthétisés, les polymères se présentent sous forme de poudres ou granulées, prêtes à être transformés en demi-produits ou en produits finis. Il existe également de nombreux procédés de transformation adaptés à la nature du polymère à mettre en œuvre et à la forme finale souhaitée :

- **Injection** ce procédé permet de donner aux matières plastiques une fois ramollies la forme - simple ou complexe - du moule dans lequel elles ont été injectées ; exemples : palettes, coques de télévisions, boîtes, pots, tableaux de bord, ...
- **Extrusion** cette méthode permet de fabriquer des produits en continu ; exemples : profilés, tubes, films, feuilles, sacs, plaques,....
- **Soufflage** les matières plastiques extrudées cette fois en discontinu (préformes) sont ensuite soufflées dans un moule pour en prendre la forme ; exemples : bouteilles, flacons, bidons, réservoirs, conteneurs,.... [43]

I.5 La filière de recyclage des plastiques

La filière de recyclage des plastiques utilise une chaîne de valeur organisée, qui commence par le tri des déchets et se termine par l'utilisation des matériaux dans de nouveaux objets. Voici une explication plus précise avec des exemples réels.

Mécanismes et exemples de recyclage :

Le recyclage des plastiques se fait généralement par deux méthodes industrielles principales, chacune convient à des sortes de déchets particuliers [44]

Approche	Principe	Exemple concret
Recyclage mécanique	Transformation physique comme le broyage, la fonte ou l'extrusion, sans altérer la structure moléculaire.	Une bouteille en PE (eau minérale) est récupérée, pilée en flocons et ensuite fondue pour être transformée à nouveau en une nouvelle bouteille.
Recyclage chimique	Décomposition moléculaire par pyrolyse ou solvolysse afin de retrouver l'état initial des monomères, c'est-à-dire la matière première brute.	La pyrolyse est utilisée pour transformer les emballages en polystyrène (comme les pots de yaourt) en huiles de pyrolyse qui peuvent être utilisées comme matières premières pétrochimiques.

Tableau I.5 représente la différence entre recyclage mécanique et chimique

I.5.1 Processus de recyclage

La chaîne de valeur se développe généralement autour de plusieurs étapes importantes qui sont effectuées dans des installations de tri et de régénération :

- Collecte et tri** : Les déchets sont rassemblés et séparés en fonction du type de résine (comme le PET, le PEHD, le PP, le PS, etc.). Le tri peut se faire soit par densité, c'est-à-dire la flottaison, soit grâce à la reconnaissance optique.
- Préparation** : Les plastiques triés sont compressés en formes rondes, puis lavés pour enlever les saletés et réduits en petits morceaux.
- Régénération** : Les paillettes passent par un processus d'extrusion à haute température qui le fait fondre, devenir uniformes et se transformer en granulés, qui peuvent ensuite être utilisés à nouveau par les fabricants de plastiques. [45]

I.5.2 Typologie des déchets PEHD (post-consommation, post-industriel)

La classification des déchets en polyéthylène haute densité (PEHD) est essentiellement basée sur leur provenance, qui a une incidence directe sur leur niveau de contamination, leur uniformité et les phases de traitement requises avant leur valorisation.



Figure 1.9 : Typologie des déchets PEHD

I.5.3 Déchets PEHD Post-Industriels (Pré-consommation)

Ces déchets viennent des différentes étapes de fabrication et de transformation des matériaux plastiques avant qu'ils ne soient achetés par le consommateur final.

Origine : Déchets de production, morceaux tombés lors du découpage, nettoyages des machines (lors du démarrage ou de l'arrêt), ou produits cassés venant des usines de fabrication des plastiques.

Caractéristiques : Ils sont généralement très propres, homogènes, peu dégradés et dépourvus d'étiquettes ou de résidus alimentaires, ce qui facilite grandement leur recyclage.

Exemples : Défauts de fabrication des tuyaux, déchets provenant du soufflage des flacons, ou excédents de granulés industriels.

Processus : Ils sont généralement réintégrés directement dans la production (broyage et ré-extrusion), ce qui demande peu d'étapes de transformation. [46]

I.5.4 Déchets PEHD Post-Consommation (PCR)

Ces déchets proviennent de produits qui ont déjà accompli leur rôle pour l'utilisateur final et ont été abandonnés après avoir été utilisés.

Origine : Recyclage réalisé par les ménages, les centres de tri ou des programmes de reprise organisés par des entreprises.

Caractéristiques : Ces flux sont plus variés et parfois souillés (présence de résidus de produits de nettoyage, de collages d'étiquettes, d'impuretés organiques). Ils ont généralement subi une détérioration causée par la chaleur ou les forces mécaniques pendant leur première utilisation.

Exemples : Bouteilles de lait, flacons de lessive, bouteilles de shampoing, ou contenants de produits d'entretien.

Le processus est plus compliqué et consomme plus d'énergie, nécessitant obligatoirement plusieurs étapes de tri, de lavage et de décontamination pour obtenir des granulés de bonne qualité.

I.5.5 Différences qualité recyclage PEHD post-consommation vs post-industriel

La différence de qualité entre le PEHD post-industriel (PIR) et post-consommation (PCR) est essentiellement déterminée par leur degré de pollution et leur stabilité structurelle.

Facteur	PEHD Post-Industriel (PIR)	PEHD Post-Consommation (PCR)
Constance	Élevée et stable (homogène)	Variable selon le lot et la saison
Contamination	Minimale (milieu contrôlé)	Élevée (aliments, saleté, étiquettes)
Traitement	Purification minimale	Lavage et tri intensifs requis

Propriétés	Proche du matériau vierge	Souvent dégradé par l'usage initial
------------	---------------------------	-------------------------------------

Tableau I.6 représente les différents qualité de recyclage PEHD

Analyse des écarts :

Qualité mécanique : Le PEHD post-industriel, provenant de rebuts de production internes, garde des propriétés physiques similaires à celles du matériau neuf, car il n'a pas été soumis à des utilisations répétées ou à des conditions environnementales. Cependant, le PEHD utilisé après consommation subit une détérioration à la fois thermique et mécanique tout au long de son cycle de vie, ce qui peut affecter ses propriétés finales.

Pureté et sécurité : La principale limite du PCR est la présence d'impuretés comme les résidus chimiques ou les contaminants organiques, ce qui exige des méthodes de nettoyage et de décontamination onéreuses pour respecter des normes de qualité élevées, particulièrement pour les emballages alimentaires. Le PIR, issu d'un environnement industriel maîtrisé, élimine ces dangers de contamination, ce qui permet d'intégrer directement ce produit dans les processus de fabrication.

Traçabilité : Bien que le PCR favorise davantage l'innovation et l'économie circulaire (en redirigeant les déchets des décharges), il nécessite des protocoles de tri et de traçabilité très précis (norme UNE-EN 15343) pour assurer la sécurité et la conformité des produits finis. [47]

I.6 Les différentes voies de recyclage

Le recyclage des plastiques, et particulièrement du PEHD, s'appuie sur trois voies technologiques majeures, chacune répondant à des besoins spécifiques en matière de pureté et d'économie circulaire

I.6.1 Recyclage chimique

Cette valorisation a pour objectif de séparer les molécules qui composent les déchets plastiques en matières premières, comme des monomères, des oligomères ou des combustibles, qui peuvent ensuite être réutilisés dans les raffineries, le secteur pétrochimique et la chimie. On distingue :

- **La pyrolyse :** consiste à décomposer des molécules en les chauffant dans un environnement sans air. Ce procédé permet d'obtenir des hydrocarbures liquides ou gazeux qui peuvent ensuite être utilisés dans les raffineries.

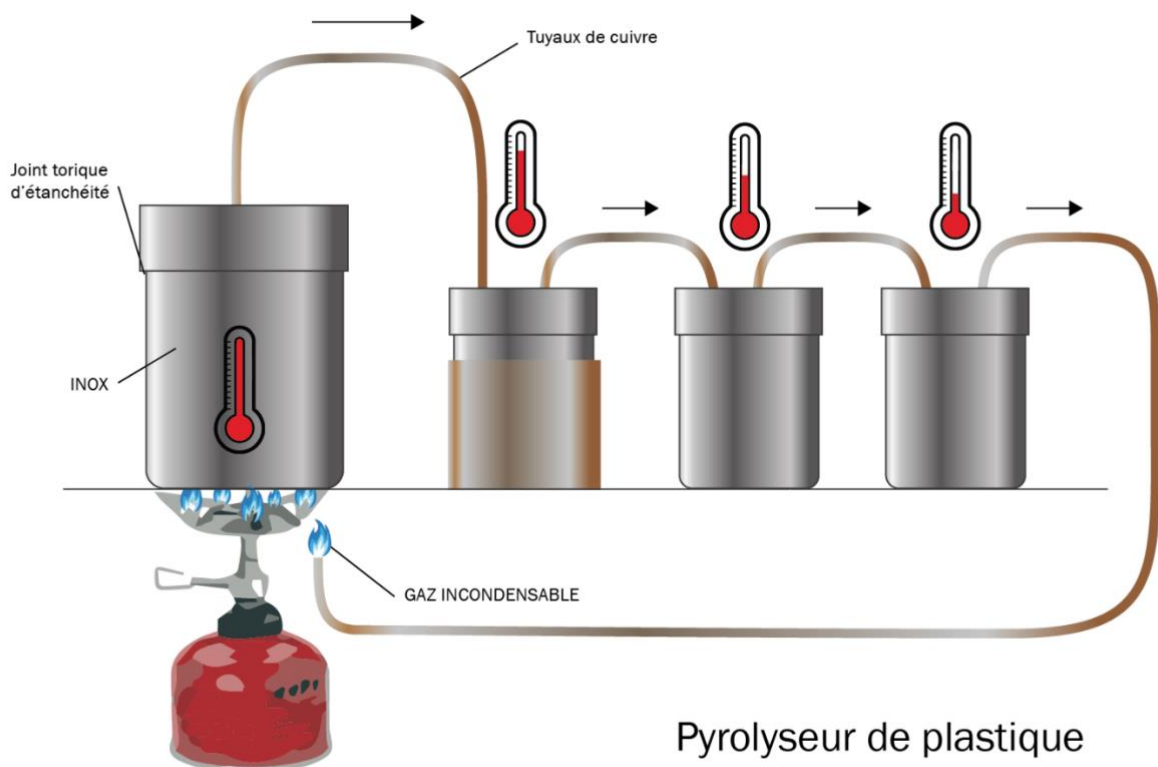


Figure I.10 : Pyrolyseur de plastique

- **L'hydrogénation :** C'est le processus où des macromolécules sont traitées avec de l'hydrogène et de la chaleur, ce qui les fait réagir et se transformer en huiles hydrocarbonées qui peuvent être utilisées dans les raffineries et les usines.

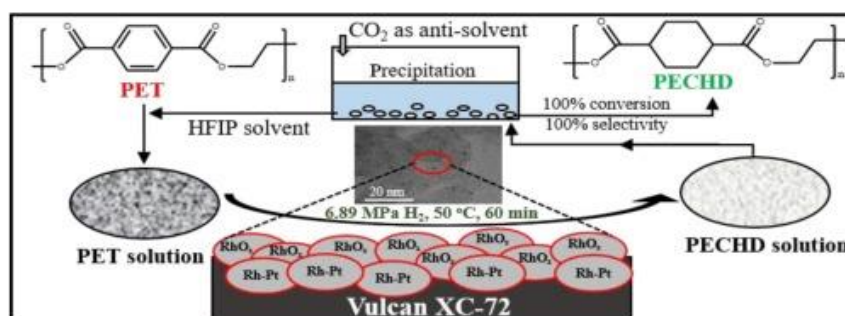


Figure I.11: représente méthode de L'hydrogénation

- **La gazéification :** les plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène. Le gaz de synthèse produit contient du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, qui peuvent servir à fabriquer du méthanol, de l'ammoniac ou agir comme agent réducteur dans certaines procédés de production d'acier.

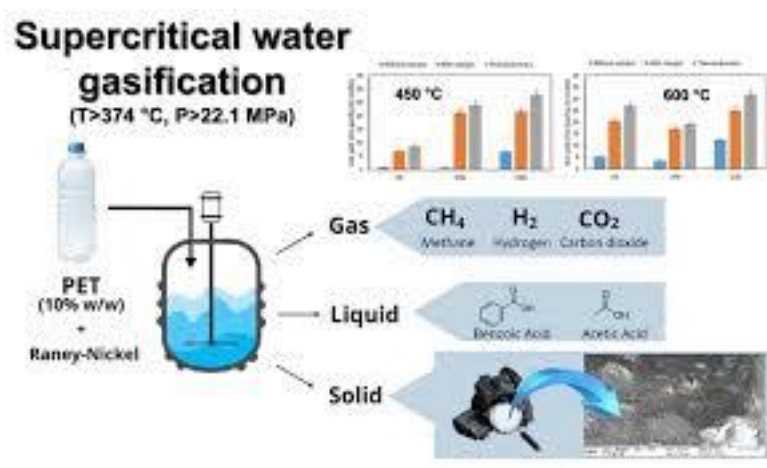


Figure I.12: Calendrier de réalisation du projet

I.6.2 Recyclage mécanique

C'est le processus le plus utilisé et le plus performant pour recycler des plastiques comme le PEHD. Il s'agit de broyer, laver et extruder les déchets afin de produire des granulés, tout en préservant la structure moléculaire du polymère. C'est la méthode préférée car elle a un impact environnemental positif et des coûts avantageux.

Le recyclage mécanique du PEHD consiste en un processus industriel précis qui permet de transformer les déchets en une matière première secondaire de très bonne qualité.

I.6.3 Les étapes clés du processus

- 1) La collecte et le tri des déchets PEHD sont effectués auprès des entreprises ou par le biais d'un tri sélectif à domicile. Le tri est très important : des machines optiques séparent le PEHD des autres types de plastique, comme le PET ou le PVC, et enlèvent les objets qui ne doivent pas être recyclés, souvent en utilisant le tri selon la densité ou la reconnaissance spectrale.
- 2) Déchiquetage (réduction de taille) : Les produits (fûts, tubes, bouteilles) sont transformés en flocons ou en copeaux afin de faciliter leur manutention. Cette étape est importante car elle permet de montrer une surface plus grande pour nettoyer et elle prépare le matériau pour la fusion.
- 3) Lavage et séparation : Les flocons sont nettoyés de manière intensive, souvent à une température élevée, afin d'enlever les résidus comme les colles, les étiquettes et les traces d'aliments. Une séparation par flottaison est souvent utilisée : le PEHD, qui est plus léger que l'eau (densité inférieure à 1 g/cm^3), reste à la surface tandis que les impuretés plus lourdes, comme les métaux ou d'autres plastiques, coulent en dessous.
- 4) Séchage : Après le nettoyage, les flocons sont séchés à l'aide de méthodes mécaniques ou thermiques afin de retirer toute humidité restante, ce qui est très important pour éviter des problèmes lors du processus d'extrusion.
- 5) L'extrusion et la granulation : les flocons secs sont ajoutés dans une extrudeuse chauffée. La matière est fondue, mélangée uniformément et filtrée une dernière fois afin d'attrapper les impuretés restantes. Le plastique fondu est tiré sous forme de fils, refroidi dans un bain tiède, puis tranché en petits morceaux prêts à utiliser pour fabriquer des objets en plastique. [47]

I.6.4 Les Avantages et inconvénients du recyclage mécanique PEHD

Le recyclage mécanique du PEHD est la méthode la plus développée pour valoriser ce matériau, mais elle nécessite un bon équilibre entre les coûts et les difficultés techniques.

➤ Avantages du recyclage mécanique

- Efficacité économique : C'est une méthode assez facile à mettre en œuvre et pas très chère en comparaison des procédés chimiques, ce qui permet de la faire fonctionner de façon économique pour gérer de grandes quantités de déchets.
- Bilan environnemental : En ne jetant pas les déchets ni en les brûlant, ce processus limite directement l'impact sur le changement climatique et économise les ressources naturelles en utilisant des matériaux recyclés à la place de nouveaux matériaux.
- Réversibilité : Le PEHD est un matériau thermoplastique ; il possède la propriété de fondre lorsqu'il est chauffé et de durcir à l'air froid, ce qui permet de le transformer plusieurs fois sans perdre ses qualités.

➤ Inconvénients et limites

- Sensibilité à la contamination : Le processus dépend fortement de la qualité initiale des déchets. La présence de sales (restes d'aliments, étiquettes, mélanges de plastiques) peut changer les qualités du granulé fini, ce qui entrave son utilisation.
- Dégradation qualitative : À chaque fois que la transformation thermique (extrusion) se répète, les chaînes des polymères peuvent subir une légère détérioration. Cela peut provoquer une diminution des propriétés mécaniques comme la résistance aux chocs et la rigidité avec le temps, ce qui peut demander parfois d'ajouter de la matière neuve pour conserver les performances.
- Contraintes de tri : Il est nécessaire de séparer très précisément le PEHD des autres plastiques, ce qui exige des installations de tri avancées et un comportement très responsable des citoyens et des entreprises. Sinon, le lot de recyclage peut être rejeté ou classé comme non adapté. [48]

I.6.5 Dissolution (recyclage physique)

On appelle aussi cela recyclage avec des solvants. Cette méthode consiste à utiliser des liquides particuliers qui permettent de faire dissoudre le polymère que l'on veut recycler, ce qui permet de le séparer des impuretés et des composants ajoutés. Elle est destinée aux flux qui ont une forte valeur ajoutée, où la pureté finale est très importante, ce qui explique la difficulté du processus.

I.7 Les différentes voies de recyclage

Le recyclage du PEHD (polyéthylène haute densité) présente plusieurs défis techniques majeurs qui limitent sa qualité et ses applications. Ces obstacles incluent des réactions chimiques indésirables, des contaminations variées et une hétérogénéité de la matière entrante :

I.7.1 Dépolymérisation et réaction dégradation

La dépolymérisation chimique du PEHD est complexe et énergivore, contrairement à celle du PET qui est plus accessible. Lors du recyclage mécanique, des réactions comme la thermo-oxydation (oxydation à haute température) et le cisaillement (frottement mécanique) dégradent les chaînes polymères, réduisant l'indice de viscosité et les propriétés mécaniques. L'ajout d'antioxydants et un lavage intensif peuvent atténuer ces effets, mais chaque cycle entraîne une perte de qualité cumulative.

I.7.2 contaminants

Les étiquettes, adhésifs et résidus organiques persistent malgré le tri et le lavage, altérant la pureté. D'autres polymères comme le PP (polypropylène) ou le PET, même en faible quantité, perturbent la cristallisation et la rhéologie du PEHD recyclé. Des compatibilisants comme l'EPDM ou le Nexamite améliorent les mélanges PEHD/PP, mais un tri minutieux reste essentiel pour des rendements élevés.

I.7.3 variabilité et contrôle qualité

La matière première recyclée varie en composition (bouteilles vs bouchons, grades viscosimétriques différents), compliquant l'extrusion et la qualité finale. Un contrôle strict en entrée, via analyses rhéologiques et modulation des flux (ex. : ajout de PEHD fluide), permet d'ajuster les propriétés. Les mélanges de grades n'impactent pas toujours négativement les mécaniques, mais exigent un monitoring précis. [48][49]

I.8 Conclusion

En somme, ce premier chapitre a permis de poser les bases théoriques indispensables à la compréhension du comportement du polyéthylène haute densité (PEHD). L'étude de sa structure semi-cristalline et de ses propriétés intrinsèques met en évidence les raisons de son succès industriel, mais révèle également sa vulnérabilité face aux agressions thermo-mécaniques et environnementales. Les connaissances issues de cet état de l'art confirment que le recyclage mécanique, bien qu'essentiel pour l'économie circulaire, induit inévitablement des phénomènes de dégradation macromoléculaire et souffre de la présence de contaminants qui altèrent les performances du matériau final. Ce constat théorique souligne l'importance d'une maîtrise parfaite du procédé de transformation. C'est pourquoi il convient à présent d'analyser en détail la réalité industrielle de ce traitement, ce qui fera l'objet du deuxième chapitre dédié à la chaîne de production du rPEHD et à la recherche de ses points d'optimisation [50]

CHAPITRE II : Analyse de la chaîne de production du rPEHD et Points d'optimisatio

II.1 Introduction

La transformation des déchets de polyéthylène haute densité post-consommation en une matière première secondaire de haute qualité (rPEHD) repose sur une succession d'étapes industrielles complexes et interdépendantes. Contrairement à la mise en œuvre de polymères vierges, le recyclage mécanique fait face à une matière première hautement hétérogène, souillée et variable. Par conséquent, la performance finale du plastique recyclé ne dépend pas uniquement de l'étape ultime de mise en forme, mais se joue dès les premières phases de la chaîne de traitement. Chaque maillon du procédé de régénération exerce une influence critique sur la pureté macromoléculaire et l'intégrité physique du matériau.

L'objectif de ce deuxième chapitre est de cartographier et d'analyser en profondeur l'ensemble de la chaîne de production du rPEHD, depuis le gisement de déchets jusqu'à l'obtention des paillettes prêtes à l'extrusion ou à l'injection. Nous mettrons particulièrement en lumière les verrous technologiques et les paramètres opératoires clés qui dictent l'efficacité du traitement, tels que l'efficacité du tri optique, l'impact de la granulométrie lors du broyage, ou encore l'influence des agents chimiques lors du lavage.

À travers cette approche systémique, nous identifierons les leviers d'optimisation prioritaires au sein du procédé industriel. Cette analyse rigoureuse est indispensable pour corrélérer les conditions de préparation de la matière avec les comportements mécaniques (traction, compression) et les traitements thermiques qui seront expérimentés et modélisés dans les chapitres suivants de ce mémoire.

II.2 collecte et tri

II.2.1 la collecte

La collecte représente un défi important, ce qui nécessite une bonne organisation pour réduire le coût du transport. Une fois que ce coût est bien géré, cela aidera beaucoup à résoudre le problème.

De la récupération. Les déchets après consommation sont souvent mélangés et contaminés quand on les collecte dans le flux des déchets de la ville.

Il existe plusieurs types de collecte :

La collecte globale : c'est une collecte multi matériaux où la phase organique des ordures ménagères est mélangée avec l'ensemble des autres déchets.

La collecte sélective : elle a pour objectif de sélectionner, au départ des ménages, un ou plusieurs types de matériaux afin de faciliter leur valorisation ou leur élimination ultérieure.

La collecte spécifique : exemple : bouteilles PET transparente



Figure II.1: collecte des déchets

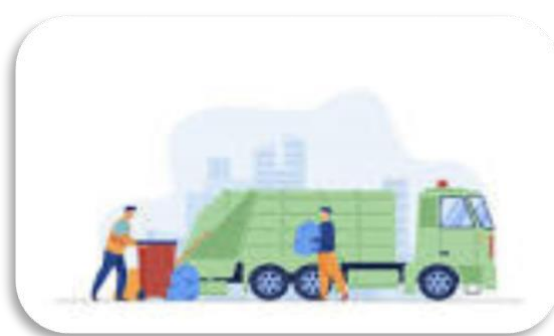


Figure I.2: Opération de collecte globale

II.2.2 le tri

Le tri est un ensemble d'actions qui servent à séparer et organiser les déchets dès qu'ils sont produits. Cela se fait en les mettant dans des bacs différents selon leur type, comme le papier, le plastique, le verre, le métal, et les déchets organiques, entre autres. Le tri à la source, qu'on appelle recyclés. Cela améliore beaucoup la qualité du recyclage et diminue la quantité de déchets qui finissent en décharge ou qui sont brûlés. Le tri des déchets se fait souvent à la maison en utilisant des bacs de couleurs différentes : un bac jaune pour les emballages, un bac vert pour le verre et un bac marron pour les biodéchets. Ensuite, les déchets triés sont ramassés séparément et emmenés vers des centres de tri. Là-bas, des machines et des techniciens les classent par catégorie avant de les envoyer dans des usines de recyclage pour les transformer en nouveaux produits. Le tri est important pour protéger les ressources naturelles, diminuer les gaz à effet de serre et soutenir l'économie circulaire.



Figure II.3: Schéma explicatif du tri sélectif à la source



Figure II.4: Tri sélectif multi-matériaux

II.2.3 le tri amont

Le tri amont, qu'on appelle aussi tri à la source, consiste à trier les déchets dès qu'ils sont produits, c'est-à-dire au moment où ils sont jetés par le producteur, que ce soit un ménage, une entreprise ou une école. Cela se fait avant que les déchets ne soient ramassés et transportés vers un centre de tri. À la différence du tri aval qui a lieu après la collecte dans un centre spécialisé, le tri amont consiste à séparer tout de suite les différents types de déchets (plastique, papier, verre, métal, organique) dans des bacs spécifiques. Cela assure une meilleure qualité des matériaux recyclables, car ils ne sont pas mélangés avec d'autres déchets. Le mot « amont » veut dire « avant » dans une série de processus, tandis que « aval » signifie « après ». Par exemple, dans un fleuve, l'amont est l'endroit où l'eau commence, et l'aval est l'endroit où elle se jette dans la mer. Cette méthode est importante pour améliorer le recyclage, diminuer les déchets dans les décharges, protéger les ressources naturelles et soutenir l'économie circulaire. En effet, plus le tri est fait tôt dans le processus, plus le recyclage devient efficace. [52]



Figure I.5: Le tri des déchets en amont au niveau ménager

II.2.4 Classification de Tri

<i>Type</i>	<i>Définition</i>
<i>Tri amont</i>	Tri effectué dès la production du déchet, chez le producteur (maison, entreprise) effectué avant collecte
<i>Tri aval</i>	Tri effectué après collecte dans un centre de tri spécialisé, avec machines et techniciens

Tableau II.2 représente La classification de tri avant et après la collecte

II.2.5 Les types de tri

a) Le tri manuel :

Le tri à la main est réalisé par des travailleurs dans les centres de tri. Les employés trient les déchets à la main en fonction de leur type, comme le plastique, le papier, le carton, le verre ou les métaux.

Ce genre de tri aide à séparer les matériaux de façon plus précise, mais il nécessite beaucoup de travail et de temps. [54]



Figure II.6: opération de tri manuelle



Figure II.7: grande table de tri



Figure II.8: représente le tri des plastiques



Figure II.9: plate-forme de tri manuelle



Figure II.10: tri des emballages



Figure II.11: table de tri manuelle

b) Le tri mécanique

Le tri mécanique emploie des machines et des technologies automatiques pour séparer les déchets. Les équipements utilisés peuvent fonctionner selon :

- ✓ La taille des déchets
- ✓ Le poids
- ✓ Les propriétés magnétiques
- ✓ La densité
- ✓ Les caractéristiques optiques

Par exemple :

Les aimants sont utilisés pour attraper les métaux ferreux.

Les séparateurs optiques identifient les différents types de plastiques.

Les tamis servent à trier les déchets en fonction de leur taille. Ce système rend le tri industriel plus rapide et plus efficace. [55]



Figure II.12: opération de tri mécanique



Figure II.13: machine de tri mécanique



Figure II.14: table de tri mécanique



Figure II.15: système de tri mécanique

c) Le tri automatique :

Le tri automatique est une façon moderne de séparer les déchets. Cela utilise des machines et des technologies avancées pour reconnaître et trier les matériaux, sans qu'il y ait beaucoup d'intervention humaine.

Ce système est surtout utilisé dans les centres de tri industriels pour rendre le recyclage plus rapide, précis et efficace. [57]



Figure II.16: système de tri automatique



Figure II.17: ligne de tri automatique



Figure II.18: machine de tri automatique

II.2.6 Les avantages de tri automatique :

Le tri automatique présente plusieurs avantages :

- Augmentation de la vitesse de tri
- Amélioration de la qualité des matériaux recyclés
- Réduction des erreurs humaines
- Diminution des coûts de main-d'œuvre
- Amélioration du rendement industrie

II.3 Impact de la qualité du tri (automatique vs manuel) sur la pureté du flux PEHD

La qualité du tri est très importante pour garantir la propreté du flux de PEHD (Polyéthylène Haute Densité) qui sera recyclé. Un bon tri aide à obtenir des

matériaux recyclés qui sont plus propres, plus uniformes et mieux adaptés pour créer de nouveaux produits en plastique.

Aspect	Tri Manuel	Tri Automatique (NIR/optique)	Impact sur pureté PEHD
Vitesse de tri	20-30 prélèvements/min	55-100/s (robotisé)	↑ Automatique = plus rapide, plus constant
Pureté obtenue	85-90%	99% pureté PEHD	↑ +9-14% de pureté avec automatique
Taux de contamination	5-15%	<1% contamination	↓ Moins de déchets hétérogènes
Détection	Visuelle humaine	Spectre NIR (proche infrarouge)	↑ NIR détecte PEHD vs PP très précisément
Fatigue opérateur	Élevée (fatigue = erreurs)	Nulle (constance 100%)	↑ Automatique = erreur humaine éliminée
Débit	Limité par humains	Jusqu'à 4,5 m/s convoyeur	↑ Débit élevé maintient

Tableau II.2 représente impact de tri sur la pureté

II.3.1 Impact de la qualité du tri manuel sur pureté de flux :

Le tri manuel est effectué par des travailleurs qui trient les déchets plastiques à la main, en fonction de leur type et de leur couleur.

Cette méthode permet :

- ✓ Une bonne identification visuelle des déchets,
- ✓ L'élimination des impuretés visibles,
- ✓ La séparation des plastiques non recyclables.

II.3.2 Les inconvénients :

Risque d'erreurs humaines,

Vitesse de traitement plus faible,

Difficulté à reconnaître certains plastiques similaires.

Dans le cas du PEHD, une séparation incorrecte peut provoquer la présence de contaminants tels que :

- Le PP (polypropylène)
- Le PVC
- Les métaux
- Les déchets organiques.

II.3.3 Impact de la qualité du tri automatique sur pureté de flux :

Le tri automatique fait appel à des technologies modernes telles que :

- ✓ Les capteurs optiques
- ✓ L'infrarouge proche (NIR)
- ✓ Les séparateurs magnétiques
- ✓ L'intelligence artificielle

Pour le PEHD, le tri automatique rend les choses meilleures :

- ✓ La pureté du flux recyclé
 - ✓ La réduction des contaminants
 - ✓ La qualité du recyclage
 - ✓ Le rendement du recyclage industriel.
- Les nouveaux centres de tri automatique peuvent obtenir un taux de pureté élevé pour le PEHD, ce qui rend sa réutilisation plus facile dans l'industrie.[59]

II.3.4 Importance de la pureté du flux PEHD :

a) Un flux de PEHD pur offre plusieurs bénéfices :

Meilleure qualité des produits recyclés,
Amélioration des propriétés mécaniques,
Réduction des défauts de fabrication,
Augmentation de la valeur économique du recyclage,
Diminution des coûts de traitement.

b) À l'opposé, un courant pollué peut entraîner :

Des problèmes de fusion,
Une baisse de résistance du matériau,
Des défauts de couleur,
Des difficultés de transformation. [60]



Figure II.19 : Impact de qualité de tri sur le flux

II.4 Pistes d'optimisation : technologies de tri et sensibilisation des consignes de tri

Pour améliorer la qualité du recyclage du PEHD et pour rendre les flux recyclés plus purs, plusieurs solutions d'optimisation peuvent être envisagées. Ces améliorations touchent surtout les nouvelles technologies de tri et l'information des consommateurs sur les règles de tri.

II.4.1 Les technologies de tri avancées :

1. Le tri par technologie NIR (Near Infrared) :

La technologie NIR (spectroscopie proche infrarouge) aide à reconnaître automatiquement les différents types de plastiques en se basant sur leur signature spectrale.

Cette technique est couramment employée dans les centres de tri modernes pour identifier rapidement des matériaux tels que :

Le PEHD,
Le PET,
Le PP, et d'autres polymères.

➤ Le tri NIR présente plusieurs avantages :

- ✓ Grande rapidité de détection,
- ✓ Amélioration de la pureté des flux plastiques,
- ✓ Réduction des erreurs de tri,
- ✓ Automatisation du processus industriel. [60]

2. Les systèmes de vision intelligente :

Les systèmes de vision emploient des caméras, des capteurs et de l'intelligence artificielle pour examiner :

- La forme,
- La couleur,
- La texture,
- Et le type des déchets.

➤ Ces technologies permettent :

- ✓ Une meilleure reconnaissance des matériaux,
- ✓ L'élimination des contaminants,
- ✓ Une amélioration de la qualité du recyclage,
- ✓ Et une optimisation du rendement industriel [60] [11]



Figure II.21 : système de tri NIR

II.4.2 Sensibilisation aux consignes de tri :

La façon dont le tri est fait dépend aussi de ce que font les consommateurs.

Une mauvaise application des règles de tri provoque la présence d'impuretés dans les matériaux recyclables.

La sensibilisation des citoyens permet :

- ✓ D'améliorer le tri à la source,
- ✓ De réduire les erreurs de tri,
- ✓ D'augmenter la qualité des déchets recyclables,
- ✓ Et de rendre le travail des centres de tri plus facile.

Les actions de sensibilisation peuvent inclure :

- ✓ Des campagnes d'information,
- ✓ Des affiches explicatives,
- ✓ Des programmes éducatifs,
- ✓ Et des applications numériques d'aide au tri [11]

II.5 Prétraitement et nettoyage :

Le prétraitement et le nettoyage sont des étapes très importantes dans le recyclage du PEHD, qui est le Polyéthylène Haute Densité. Après avoir ramassé et trié les déchets de PEHD, il faut les préparer pour enlever les impuretés et obtenir une matière recyclée qui soit propre et uniforme. Ces actions rendent le recyclage de meilleure qualité et aident à sa transformation dans l'industrie.

1) Broyage du PEHD

Le broyage est la première étape du prétraitement du PEHD. Les déchets en plastique, comme les bouteilles, les bidons ou les emballages en PEHD, sont mis dans des broyeurs industriels qui ont des lames tournantes. Ces lames coupent le plastique en petits morceaux qu'on appelle « broyats » ou « paillettes ».

Pour le PEHD, le broyage aide à diminuer le volume des déchets et à créer des morceaux de taille uniforme. Cette diminution rend plus faciles les actions suivantes comme le nettoyage et la séparation. Le broyage aide aussi à enlever plus facilement certaines impuretés qui se trouvent sur le plastique, comme les étiquettes, les restes de produits ou les bouchons.

Une taille égale des paillettes rend le recyclage plus efficace et garantit une meilleure qualité du matériau recyclé. [12]



Figure II.22: broyeur de plastique



Figure II.23: broyeur de recyclage



Figure II.24: broyeur de tuyaux

2) Lavage du PEHD

Après avoir broyé, les morceaux de PEHD passent par un lavage pour enlever les impuretés qui se trouvent sur la surface du plastique. Les déchets de PEHD après utilisation peuvent avoir des poussières, des huiles, des restes de nourriture, des colles, des encres ou d'autres substances organiques.

Le nettoyage peut se faire avec de l'eau froide ou de l'eau chaude, en ajoutant des produits de nettoyage industriels selon combien c'est sale. Dans certains cas, on utilise des bains alcalins pour mieux nettoyer les plastiques qui sont très sales.

Pour le PEHD, cette étape est essentielle car des impuretés peuvent abîmer les caractéristiques mécaniques du matériau recyclé et causer des problèmes lors de l'extrusion. Un bon nettoyage améliore donc la propreté du flux de PEHD et augmente la qualité du produit final.



Figure II.25: représente ligne de lavage

3) La séparation densimétrique

La séparation densimétrique est une technique qui permet de diviser les matériaux en fonction de leur densité. Cette méthode est très bien pour recycler le PEHD parce que ce plastique a une densité qui est plus basse que celle de l'eau.

Les paillettes en plastique sont mises dans des bassins qui contiennent de l'eau.

Le PEHD flotte à la surface,
Pendant que les matériaux plus lourds descendent au fond.

Cette procédure permet de se débarrasser de divers polluants comme :

- Les métaux,
- Le verre,
- Certains plastiques incompatibles,
- Ou les particules lourdes.

La séparation densimétrique augmente beaucoup la pureté du flux de PEHD et diminue les risques de contamination du matériau recyclé. Cette étape est très importante pour obtenir un recyclat qui soit de bonne qualité pour l'industrie.



Figure II.26: séparateur densimétrique



Figure II.27: table de densimétrique

4) Séchage du PEHD

Après le lavage et la séparation par densité, les paillettes de PEHD gardent encore un peu d'eau. Le séchage a pour but d'enlever cette humidité avant de transformer le plastique recyclé.

Dans le recyclage du PEHD, l'humidité qui reste peut causer plusieurs soucis pendant le processus d'extrusion.

Apparition de bulles,
Mauvaise fusion du polymère,
Défauts de surface,
Diminution des propriétés mécaniques.

Le séchage se fait en général d'abord par centrifugation, puis avec de l'air chaud industriel. Cette étape assure une meilleure stabilité du matériau pendant la fusion et améliore la qualité des granulés recyclés.

Un bon séchage aide à obtenir un PEHD recyclé qui est plus uniforme et plus adapté pour les usages industriels.



Figure II.28: système Séchage



Figure II.29: sécheur à mélange verticale

II.6 Optimisation des paramètres :

II.6.1 températures de lavage :

Lors du recyclage du PEHD (Polyéthylène Haute Densité), il est très important de bien laver les déchets plastiques. Cette étape permet de se débarrasser des salissures comme la poussière, les restes de matières organiques, les huiles, les colles et les étiquettes qui se trouvent sur les plastiques récupérés. La température de lavage est un facteur important qui affecte l'efficacité du processus. Une hausse de la température aide à dissoudre les impuretés et rend plus efficace l'action des produits tensioactifs utilisés lors du nettoyage. Cependant, une température trop élevée fait augmenter la consommation d'énergie et les frais de traitement. [13][14]

II.6.2 Efficacité des agents de lavage :

L'efficacité des produits de nettoyage est très importante pour améliorer la qualité du PEHD qui est recyclé. Les solutions de nettoyage, qui sont alcalines, ainsi que les agents tensioactifs, sont utilisées pour diminuer les interactions entre les impuretés et la surface du polymère. L'efficacité du nettoyage repose surtout sur plusieurs éléments : la concentration du savon, le temps de lavage, le mouvement mécanique et le type de salissures.

Améliorer ces paramètres aide à obtenir un matériau recyclé plus pur et à renforcer ses propriétés mécaniques quand il est réutilisé dans l'industrie.[15]

Ainsi, une bonne réduction de l'humidité restante aide à améliorer la qualité et le fonctionnement du matériau recyclé. [16] [17]

Paramètre	Valeur Optimale	Impact
Température de lavage	85-95°C (lavage chaud)	Décontamination complète sans dégrader PEHD
Température MAX	≤90°C	PEHD non dégradé à 90°C (point de fusion ~130°C)
Agents de lavage	Eau alcaline + friction	Dissout colle, graisse, résidus tenaces
Taux hum. Résiduelle	<2% (paillettes rigides)	Requis pour granulation/extrusion
Taux hum. films	1-3%	Films PEHD
Taux hum. Optimal	0,4-0,06% (séchage étagé)	Humidité poids ultra-faible
Taux hum. Système haut	<0,5%	Réponse exigences strictes granulation

Tableau II.3 : représente optimisation des paramètres

II.7 Conclusion

En conclusion, l'analyse approfondie de la chaîne de production du PEHD recyclé (rPEHD) montre que la qualité de la matière première secondaire est le résultat direct d'une synergie entre chaque étape du procédé. Du tri optique initial jusqu'au contrôle rigoureux de l'humidité résiduelle et des agents de lavage, chaque paramètre opératoire joue un rôle déterminant pour limiter l'impact des contaminants et stabiliser le polymère. Cette étude technique a permis d'identifier les zones critiques du processus industriels où des gains de qualité substantiels peuvent être obtenus. Toutefois, la caractérisation purement industrielle reste insuffisante pour prédire avec exactitude le comportement mécanique de la matière régénérée. Pour valider concrètement ces pistes d'optimisation, il est fondamental de passer à l'échelle du laboratoire afin d'évaluer l'impact physique réel de facteurs clés tels que la taille des grains et les cycles thermiques. Cette démarche expérimentale fera l'objet du troisième chapitre de ce travail.

CHAPITRE III : Approches Expérimentales et Résultats

III.1 Introduction

La prolifération des déchets plastiques est devenue un défi environnemental et sanitaire majeur, rendant urgent le recours à des méthodes de recyclage durables. Le polyéthylène haute densité (PEHD) (Petlitchkaia et al. 2024 ; Elnaml et al. 2023 ; Faisal et al. 2021), un thermoplastique largement utilisé, est un candidat de choix pour le recyclage en raison de sa polyvalence et de la forte demande dont il fait l'objet dans diverses applications industrielles, notamment les matériaux utilisés dans les dispositifs médicaux et les emballages. Cependant, l'efficacité de la production de PEHD à partir de déchets plastiques est influencée par de multiples facteurs, notamment la taille des grains du matériau d'entrée et les conditions thermiques appliquées pendant le traitement.

La convergence des principes d'ingénierie et des sciences des matériaux a joué un rôle essentiel dans l'avancement de divers domaines, notamment les soins de santé et l'intégrité structurelle. Les recherches dans ce domaine ont souligné l'importance cruciale de l'optimisation du comportement, des propriétés des matériaux et des performances structurelles.

La fusion des innovations matérielles et des aspects humains est un élément clé de l'optimisation des systèmes de santé. Titah et Hachemi (2024) ont souligné l'importance du comportement des médecins dans les résultats des soins de santé, notant que les approches axées sur le comportement augmentent non seulement l'efficacité opérationnelle, mais réduisent également les erreurs et améliorent les soins aux patients. Ce point de vue est cohérent avec l'optimisation matérielle, où des améliorations systémiques peuvent être obtenues en utilisant des matériaux novateurs en conjonction avec des techniques comportementales.

Les développements dans le domaine des microcomposites polypropylène/talc ont donné des résultats encourageants en termes de performances et de durabilité dans le domaine des matériaux composites. Bechikhi et al. (2024) ont examiné la distribution de la macro-dureté dans ces composites, soulignant leur adéquation pour des utilisations qui nécessitent des matériaux à la fois légers et durables. Les résultats ont des implications pour les environnements hospitaliers, où la longévité des équipements est cruciale.

Les déchets plastiques sont également devenus un domaine d'intérêt majeur pour l'innovation en matière de matériaux. Scroggin (2024) a exploré le potentiel de la conception et de la construction à partir de déchets plastiques, soulignant le double avantage de la durabilité et de la fonctionnalité. Cela rejoint les travaux de Díaz-Mendoza et al. (2022), qui ont utilisé des déchets provenant de la taille des vergers de noix de pécan pour renforcer des composites thermoplastiques, démontrant ainsi que

les matériaux dérivés de déchets peuvent atteindre une robustesse mécanique comparable à celle des matériaux traditionnels.

De plus, les innovations dans le domaine des matériaux biodégradables offrent des alternatives prometteuses aux plastiques traditionnels, en particulier dans le domaine médical. Moshkbid et al. (2024) ont passé en revue les défis et le potentiel des matériaux biodégradables, mettant en avant leur capacité à répondre aux exigences strictes du secteur de la santé tout en tenant compte des préoccupations environnementales. Noori et al. (2018) ont également contribué à ce débat en utilisant des emballages de médicaments usagés comme matériau rentable pour les électrodes de piles à combustible microbiennes, illustrant ainsi la valeur de la réutilisation des déchets dans l'optimisation des ressources.

Les progrès réalisés dans le domaine des sciences des matériaux ont également contribué de manière significative à relever les défis structurels dans les applications techniques. Bachir Bouiadjra et al. (2024) ont étudié les effets du décollement sur les contraintes de cisaillement dans les assemblages collés soumis à des charges mécaniques. Leurs conclusions ont révélé des informations cruciales sur les mécanismes de défaillance, fournissant ainsi une base pour la conception de systèmes collés plus résistants. De même, leur étude comparative sur l'analyse numérique et expérimentale du placement des renforts dans des plaques à encoches circulaires a permis de mieux comprendre la répartition des contraintes et le positionnement optimal des renforts (Bachir Bouiadjra et al., 2024). La réparation des composants structurels, en particulier dans les applications aérospatiales, a été un domaine d'intérêt important.

La comparaison entre les patchs composites et métalliques utilisés pour réparer les structures en alliage d'aluminium a démontré la supériorité des composites en termes de résistance à la fatigue et de répartition des charges (Bachir Bouiadjra et al., 2015). Des études ultérieures ont exploré l'impact des dimensions et des configurations des patchs, révélant que des facteurs tels que la longueur et la forme des patchs jouent un rôle essentiel dans l'efficacité des réparations (Albedah et al., 2017 ; Khan et al., 2021 ; Nourrdine et al.). Ces résultats ont des implications pratiques pour prolonger la durée de vie des composants aéronautiques et réduire les coûts de maintenance.

Le recyclage et la valorisation des déchets de polyéthylène haute densité (PEHD) ont suscité un intérêt considérable ces dernières années en raison du besoin critique d'une gestion durable des matériaux et de la demande croissante de produits écologiques dans divers secteurs. Plusieurs études ont exploré des stratégies et des techniques innovantes pour améliorer l'efficacité et l'applicabilité du recyclage du PEHD, en particulier dans la création de nouveaux matériaux et l'atténuation des impacts environnementaux.

Des recherches ont démontré la polyvalence du PEHD recyclé (rPEHD) dans la création de matériaux fonctionnels et durables. Faisal et al. (2021) ont examiné la production de briquettes en combinant des déchets plastiques en PEHD avec de la

sciure de bois de teck, en utilisant des adhésifs naturels comme liants. Leurs conclusions ont mis en évidence le potentiel des déchets en PEHD à servir de matériau structural et économe en énergie lorsqu'ils sont combinés avec d'autres ressources issues de déchets. De même, Petlitckaia et al. (2024) ont étudié l'intégration du PEHD et des déchets de liège dans la production de matériaux composites, démontrant des propriétés mécaniques améliorées et des avantages environnementaux, et mettant en évidence le rôle du PEHD dans les applications composites.

En outre, le PEHD a fait l'objet d'efforts importants visant à améliorer la qualité et les propriétés du PEHD recyclé grâce à l'optimisation des processus. Dany et al. (2021) ont souligné l'importance des méthodes de désodorisation dans les applications du PEHD recyclé, en s'attaquant aux problèmes d'odeur qui limitent son utilisation dans des applications sensibles. Leur étude a présenté plusieurs techniques de désodorisation visant à améliorer l'acceptabilité sensorielle du PEHD recyclé, élargissant ainsi son utilisation dans les industries exigeant des normes de pureté plus élevées. Elnaml et al. (2023) ont exploré l'application du PEHD dans les mélanges d'asphalte durables, mettant en évidence son potentiel dans le développement des infrastructures.

En incorporant des déchets de PEHD dans l'asphalte, l'étude a démontré des améliorations en termes de durabilité et de résistance, ouvrant la voie à son adoption dans les matériaux de construction. L'intégration du PEHD dans des systèmes de matériaux avancés a été au centre des recherches. Wani et al. (2020) ont examiné l'incorporation du PEHD dans les mélanges de béton, soulignant son potentiel pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité environnementale des matériaux de construction. Cela souligne la polyvalence du PEHD au-delà des applications conventionnelles.

En outre, Faisal et al. (2021) et d'autres études ont souligné l'importance de mélanger le PEHD avec d'autres matériaux afin d'obtenir les propriétés souhaitées. Ces efforts permettent non seulement d'améliorer les performances des matériaux, mais aussi de contribuer à l'efficacité des ressources en utilisant divers flux de déchets.

Le défi croissant que représente la gestion des déchets plastiques a donné lieu à des recherches approfondies sur les méthodes de recyclage innovantes et la conversion des déchets en ressources précieuses. Des études récentes se sont concentrées sur la caractérisation, l'optimisation et l'utilisation des flux de déchets plastiques, en mettant l'accent sur les approches durables et la récupération des matériaux. De Jesus et al. (2023) ont mené une analyse approfondie des mélanges de polymères obtenus à partir de déchets plastiques collectés sur les plages brésiliennes, révélant le potentiel de création de nouveaux matériaux grâce à la combinaison de polystyrène (PS), de polypropylène (PP), de polyéthylène haute densité (PEHD) et de polyéthylène basse densité (PEBD). Cette recherche souligne l'importance de comprendre la compatibilité des polymères et leurs comportements lors du traitement afin de développer des produits durables et polyvalents à partir de flux de déchets plastiques mixtes.

Les processus thermiques tels que la pyrolyse sont apparus comme une stratégie clé pour convertir les déchets plastiques en combustibles hydrocarbonés. Afriadi et Muhammad Yasin (2023) ont optimisé l'utilisation de catalyseurs naturels dans la production d'huile à partir de la pyrolyse des déchets plastiques, obtenant ainsi des rendements et une efficacité énergétique plus élevés. De même, Ghodke et al. (2020) ont synthétisé des catalyseurs à base d'argile à piliers afin d'améliorer la production de combustibles hydrocarbonés à partir de déchets plastiques, soulignant le rôle essentiel des catalyseurs dans l'amélioration de la cinétique des réactions et de la qualité des produits.

Les déchets plastiques recyclés ont trouvé des applications dans divers domaines, notamment la construction et la valorisation énergétique. V.I. et al. (2022) ont étudié l'incorporation de plastiques en fin de vie dans la production de pavés, démontrant leur utilité en tant que matériau de construction durable. Faisal et al. (2021) ont mis au point des briquettes en mélangeant des déchets de PEHD avec de la sciure de teck, présentant ainsi une nouvelle utilisation des déchets plastiques pour la production d'énergie.

De plus, Alali et al. (2023) ont mis au point un système qui transforme les déchets plastiques en composés utiles tels que les composés alkyl-aromatiques, offrant ainsi une solution de valorisation des déchets à l'échelle industrielle. La nécessité urgente de mettre en place des systèmes de recyclage localisés adaptés à la composition des déchets régionaux a été soulignée par l'évaluation de Zhao et al. (2022) des modèles de production de déchets plastiques à Chengdu, en Chine. L'élimination des microplastiques a été étudiée à l'aide de techniques biologiques, telles que l'utilisation de microalgues. La double capacité des microalgues à éliminer les microplastiques HDPE, LDPE, PP et PVC tout en produisant de l'énergie a été démontrée par Sponza et Öztekin (2023), qui ont mis au point une nouvelle méthode combinant gestion des déchets et récupération d'énergie. Dans leur analyse de l'état de la gestion des déchets plastiques et des technologies de recyclage, Otitoju et al. (2023) ont souligné l'importance de combiner des approches mécaniques, chimiques et biologiques pour traiter la nature diversifiée des déchets plastiques. L'étude préconise une approche holistique qui combine la minimisation des déchets, le recyclage et la récupération des ressources.

Afin d'optimiser la production de PEHD à partir de déchets plastiques, cette étude examine la relation entre la taille des grains et les conditions thermiques. Grâce à une analyse expérimentale, nous espérons comprendre comment ces paramètres influencent le rendement, les propriétés des matériaux et la qualité du PEHD recyclé. Le PEHD étant essentiel dans l'industrie des matériaux médicaux, où des qualités telles que la résistance, la pureté et la stabilité thermique sont cruciales, nos conclusions pourraient orienter les stratégies visant à améliorer les procédures de recyclage et à créer du PEHD présentant des propriétés spécifiques aux applications médicales. Les résultats de cette étude pourraient non seulement augmenter l'efficacité du recyclage, mais aussi soutenir une économie circulaire dans l'industrie des matériaux médicaux,

en réduisant la dépendance au plastique vierge tout en minimisant les effets sur l'environnement.

III.2 Test de compression

L'essai de compression, également appelé essai de résistance à la compression ou essai de résistance à l'écrasement, est une méthode utilisée pour évaluer la résistance d'un matériau ou d'une structure à une force de compression ou à une charge appliquée. Cet essai est couramment utilisé dans l'industrie pour mesurer la résistance et la durabilité des matériaux utilisés dans divers produits, tels que les emballages, les conteneurs, les cylindres, les tuyaux, les poutres, etc.

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cubiques de 40 mm de côté. Les résultats permettent d'évaluer les performances et la qualité des matériaux ou produits testés, de comparer différents matériaux ou produits et de garantir leur conformité aux normes et spécifications requises. L'essai a été réalisé à l'aide de la machine illustrée à la figure 1.



Figure III.1: Machine de compression

III.3 Test de la traction

L'essai de traction est une méthode courante pour évaluer la résistance mécanique des matériaux. Cet essai est réalisé en tirant sur un échantillon d'un matériau spécifique

dans le sens de sa longueur, généralement à l'aide d'une machine d'essai universelle. L'objectif de cet essai est de mesurer la charge nécessaire pour étirer l'échantillon jusqu'à sa rupture.

L'essai de traction est particulièrement utile pour déterminer la résistance d'un matériau lorsqu'il est soumis à des forces de traction, courantes dans de nombreuses applications. Les résultats obtenus à partir de cet essai sont souvent utilisés pour évaluer la qualité des matériaux, concevoir des structures et des produits, et comparer différents types de matériaux.

L'échantillon de matériau testé est de forme prismatique et comprend une section carrée, appelée section d'essai, qui est maintenue dans la machine d'essai universelle. La machine tire progressivement sur l'échantillon, en appliquant une force croissante jusqu'à ce que la pièce se rompe.

Les résultats de l'essai de traction comprennent la force de traction maximale nécessaire pour rompre l'échantillon, ainsi que sa déformation maximale et sa longueur finale. À partir de ces mesures, il est possible de calculer des propriétés telles que la résistance à la traction, le module d'élasticité et la limite d'élasticité, qui caractérisent la réponse du matériau lorsqu'il est soumis à une charge de traction.

Les dimensions de l'échantillon testé sont ($L = 150 \text{ mm}$, $b = 25 \text{ mm}$, $e = 5 \text{ mm}$), testé sur la machine illustrée à la figure 2.

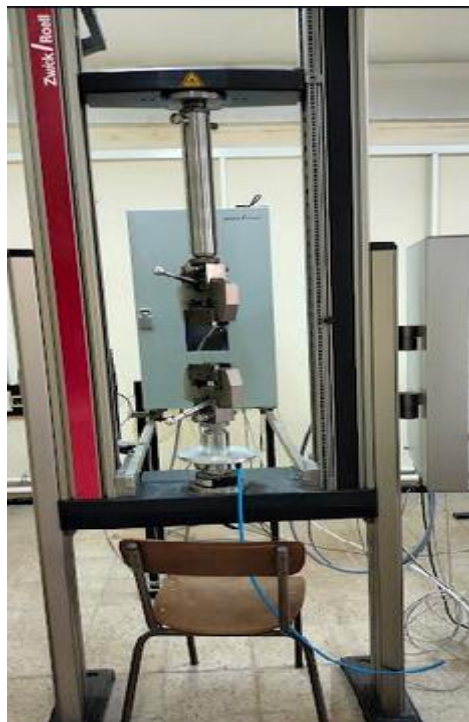


Figure III. 2 : Servohydraulic Machine

III.4 Résultats et discussion :

La figure 3 présente un graphique comparatif illustrant le comportement mécanique de deux échantillons sous compression :

Le graphique présente deux courbes :

Une courbe noire représentant un échantillon traité par refroidissement à l'huile.

Une courbe rouge représentant un échantillon non traité.

Caractéristiques principales :

L'axe vertical (y) représente la contrainte en MPa.

L'axe horizontal (x) indique le temps en unités arbitraires.

Les deux courbes suivent une tendance similaire jusqu'à environ 10 unités de temps.

La courbe de l'échantillon non traité (rouge) atteint son point de rupture plus tôt, autour de 14 MPa.

L'échantillon traité à l'huile (noir) résiste plus longtemps et atteint une contrainte maximale plus élevée, environ 18 MPa.

Cette comparaison met en évidence que le traitement par refroidissement à l'huile améliore la résistance mécanique du matériau sous compression, permettant une plus grande déformation avant rupture et une résistance maximale plus élevée.

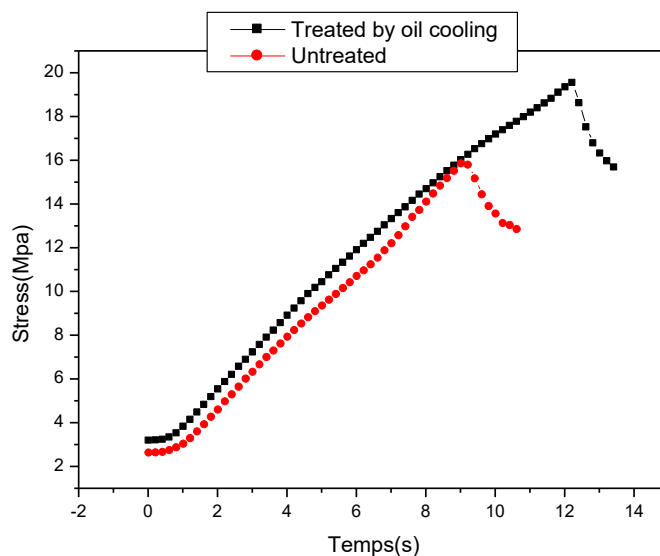


Figure III.3: Comparaison entre un échantillon non traité thermiquement et un échantillon traité à l'huile soumis à une contrainte de compression.

La figure présente un graphique comparatif illustrant le comportement de deux échantillons sous compression :

Un échantillon traité par refroidissement à l'eau représenté par la ligne noire avec des carrés.

Un échantillon non traité représenté par la ligne rouge avec des triangles.

Caractéristiques principales :

L'axe X représente la temps.

L'axe Y représente la contrainte.

Les deux courbes suivent une trajectoire similaire jusqu'à environ 10 sur l'échelle de température.

À partir de ce point, les comportements divergent :

L'échantillon non traité montre une diminution de la contrainte.

L'échantillon refroidi continue d'augmenter jusqu'à environ 19-20 MPa avant de chuter.

La contrainte maximale atteinte est d'environ 20 MPa pour l'échantillon traité.

Les deux échantillons commencent avec une contrainte initiale d'environ 2-3 MPa.

Le traitement par refroidissement à l'eau semble améliorer la résistance à la compression de l'échantillon.

Cette comparaison met en évidence l'effet bénéfique du traitement thermique par refroidissement à l'eau sur la résistance mécanique du matériau testé.

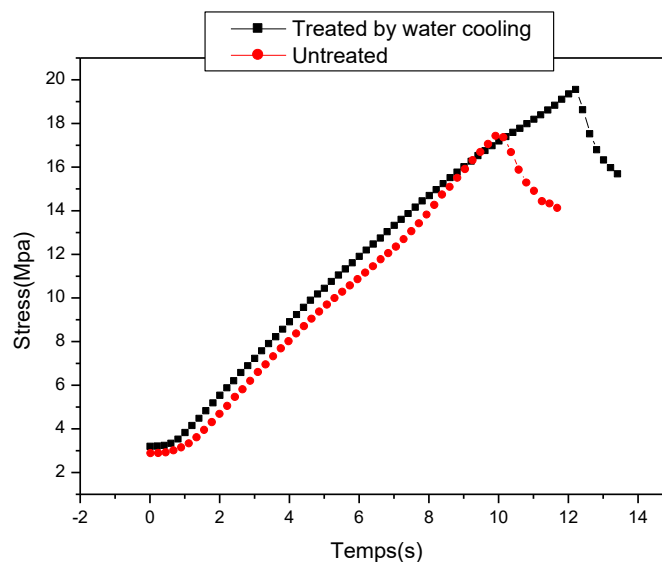


Figure III.4: Comparaison entre un échantillon non traité thermiquement et un échantillon traité à l'eau soumis à une contrainte de compression.

La figure montre un graphique comparant deux traitements thermiques différents sur des échantillons soumis à une contrainte de compression :

Axe X : temps (s)

Axe Y : contrainte (MPa)

Une courbe noire représentant le traitement par refroidissement à l'huile.

Une courbe rouge représentant le traitement par refroidissement à l'eau.

Les deux courbes montrent une évolution similaire jusqu'à environ 8 secondes, avec une augmentation progressive et linéaire de la contrainte. Au-delà de ce point, on observe une divergence significative :

La courbe du refroidissement à l'huile atteint son maximum autour de 14 MPa, puis chute rapidement.

La courbe du refroidissement à l'eau continue jusqu'à environ 17 MPa avant de commencer à diminuer plus progressivement.

Cette différence suggère que le traitement par refroidissement à l'eau entraîne une résistance à la compression légèrement supérieure à celle du refroidissement à l'huile, tout en offrant une meilleure ductilité après le point maximal.

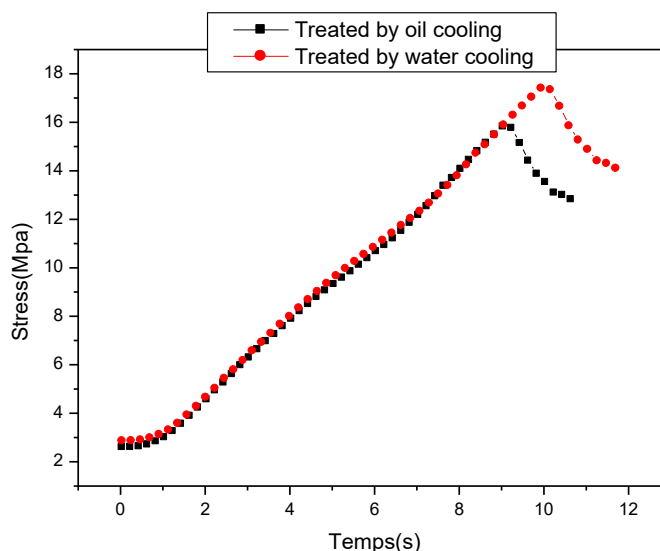


Figure III. 5: Comparaison entre un échantillon traité thermiquement à l'eau et un échantillon traité à l'huile soumis à une contrainte de compression.

La figure présente les résultats des essais de compression réalisés sur des graines de différentes tailles.

Le graphique montre l'évolution de la contrainte en fonction du temps pour trois tailles de graines différentes. L'axe vertical est gradué en MPa (mégapascals) et l'axe horizontal en secondes.

Les trois courbes présentent des caractéristiques distinctes :

Graines de 1 mm

Atteignent une résistance maximale d'environ 10 MPa - Affichent les meilleures performances sous compression - Présentent une rupture plus nette après le pic

Graines de 2 mm

Suivent une trajectoire similaire à celle des graines de 1 mm

Atteignent un pic légèrement inférieur, autour de 9 MPa

Affichent une diminution progressive après le pic

Graines de 3 mm

Présentent la résistance la plus faible - Atteignent un maximum d'environ 7 MPa - Présentent une courbe plus plate.

Le processus de compression peut être divisé en trois phases distinctes :

Phase d'adaptation initiale (0-2 s) - Phase de compression principale avec augmentation rapide de la contrainte (2-6 s) - Phase post-pic avec diminution de la résistance (6-8 s)

- Cette expérience démontre clairement que la taille des graines influence inversement leur résistance à la compression.

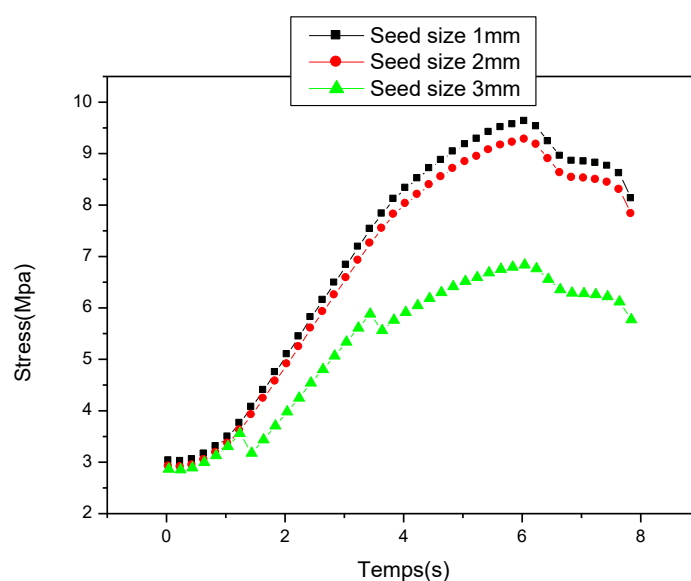


Figure III. 6: Effet de la taille des graines sur les échantillons soumis à une contrainte de compression.

La figure montre un graphique illustrant l'effet du traitement thermique sur le comportement mécanique d'échantillons soumis à une contrainte de traction.

L'axe horizontal représente l'allongement longitudinal en pourcentage (%).

L'axe vertical représente la contrainte en MPa.

Courbe noire : refroidissement à l'eau. Courbe rouge : refroidissement à l'air. Courbe verte : refroidissement à l'huile.

Observations clés :

Les trois courbes suivent une tendance similaire avec une phase élastique initiale. Le refroidissement à l'eau (courbe noire) présente la résistance maximale, atteignant environ 10 MPa. Le refroidissement à l'air (courbe rouge) présente une résistance intermédiaire. Le refroidissement à l'huile (courbe verte) présente la résistance la plus faible. L'allongement maximal se situe autour de 15 à 20 % pour toutes les méthodes de refroidissement. Au-delà de ce point, on observe une diminution de la contrainte, indiquant une défaillance du matériau. Le type de refroidissement influence considérablement la résistance mécanique du matériau.

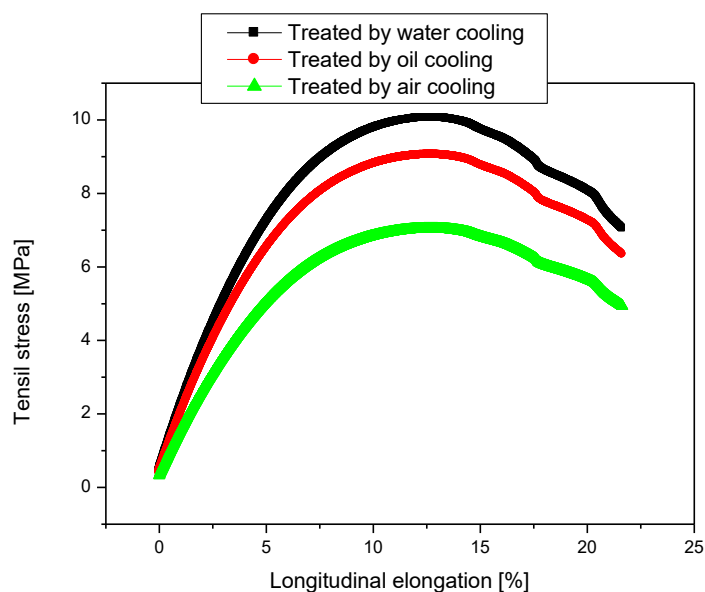


Figure III.7: Effet du traitement thermique sur des échantillons soumis à une contrainte de traction

La figure montre un graphique illustrant l'effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des échantillons soumis à une contrainte de traction. Voici une analyse détaillée :

Axe X : allongement longitudinal en pourcentage (%). Axe Y : contrainte en MPa. Trois courbes pour différentes tailles de grains :

Taille 1 mm (courbe noire). Taille 2 mm (courbe rouge). Taille 3 mm (courbe verte)

Les courbes montrent que la taille des grains influence considérablement le comportement mécanique :

Les grains plus petites (1 mm) présentent la résistance maximale, atteignant environ 7,5 MPa. Les grains de taille moyenne (2 mm) présentent une résistance intermédiaire, avec un pic autour de 7 MPa. Les grains plus grosses (3 mm) présentent la résistance

la plus faible, avec un maximum d'environ 5,5 MPa. Toutes les courbes suivent une tendance similaire avec une phase élastique initiale, suivie d'un pic de résistance autour de 15 % d'allongement, puis d'une diminution progressive de la résistance.

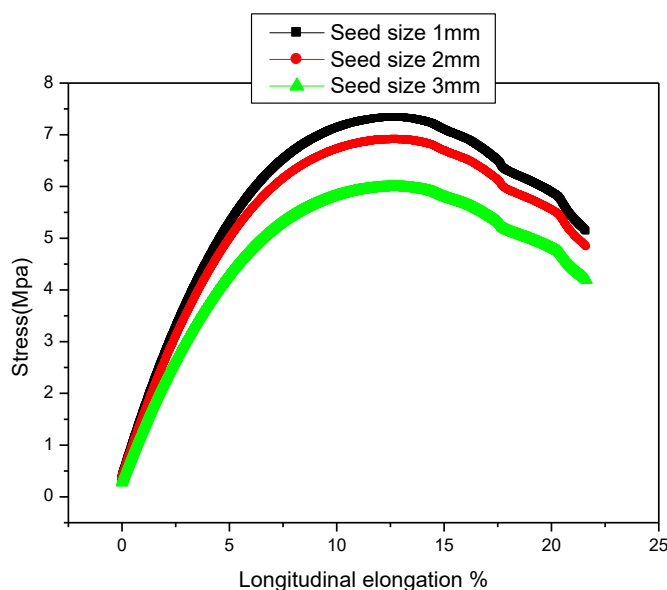


Figure III.8: Effet de la taille des grains sur des échantillons soumis à une contrainte de traction

II.5 Résultat et perspectives et discussion

Dans cette phase de laboratoire, des essais physiques réels (traction et compression) ont été menés sur des éprouvettes en rPEHD afin d'évaluer l'impact de deux facteurs : la granulométrie (taille des grains) et le traitement thermique (mode de refroidissement après fusion).

L'effet de la taille des grains (Granulométrie) :

- **En traction et en compression** : Les particules de petite taille (1 mm et 2 mm) donnent les meilleurs résultats, atteignant les niveaux de contrainte maximale les plus élevés (~9-10 MPa en traction).
- **Le point faible** : Les gros grains de 3 mm affichent une résistance nettement inférieure (chute à environ 7 MPa) et un temps avant la rupture beaucoup plus court.
- **Conclusion granulométrique** : Une taille de grain inférieure ou égale à 2 mm est optimale pour préserver les propriétés mécaniques du plastique recyclé.

L'effet du traitement thermique (Refroidissement) :

- **Refroidissement à l'eau** : C'est de loin le traitement qui offre les meilleures performances mécaniques globaux. En traction, il atteint le pic maximal

(~10 MPa) et en compression, il permet de supporter la contrainte la plus élevée (~17 MPa) tout en retardant la rupture.

- **Refroidissement à l'huile** : Il présente des performances intermédiaires. Son comportement en compression est proche de celui de l'eau au début, mais sa résistance finale reste légèrement inférieure.
- **Refroidissement à l'air** : C'est le mode de refroidissement qui donne les résultats les plus faibles, avec une résistance minimale sur tous les tests (~6 en traction).

La combinaison Petits Grains (1 mm) + Refroidissement à l'Eau qui a donné de loin les meilleurs résultats

- **Le meilleur traitement (Eau)** : Le refroidissement à l'eau est le grand gagnant. C'est lui qui permet d'atteindre la résistance maximale (la contrainte la plus élevée), avec environ 10 MPa en traction et 17 MPa en compression. Il surpasse nettement l'huile et l'air.
- **La meilleure taille de grains (1 mm)** : Les petits grains permettent au matériau de mieux fusionner et d'être plus homogène. Les éprouvettes faites avec des grains de 1 mm et 2 mm ont été beaucoup plus résistantes que celles faites avec des gros grains de 3 mm (qui cassent très vite et affichent une résistance médiocre d'à peine 7 MPa)

En conclusion Le résultat le plus marquant et le plus performant de la partie expérimentale est l'utilisation du rPEHD à granulométrie fine (< 1 mm) refroidi rapidement dans l'eau. C'est cette combinaison optimale qui offre les meilleures propriétés mécaniques pour ce plastique recyclé.

II.6 Conclusion

L'analyse des résultats nous permet de tirer des conclusions importantes sur le comportement mécanique du matériau dans différentes conditions :

Effet de la taille des graines. En traction, les graines de 1 mm et 2 mm présentent des performances similaires avec une contrainte maximale d'environ 7 à 7,5 MPa. Les graines de 3 mm présentent une résistance nettement inférieure (environ 6 MPa). L'allongement maximal reste similaire (environ 20 %) quelle que soit la taille.

En compression

Les graines de 1 mm et 2 mm atteignent des contraintes maximales similaires (environ 9-10 MPa). Les graines de 5 mm présentent une résistance nettement inférieure (environ 7 MPa). Le temps de rupture est plus court pour les graines de plus grande taille.

Impact des traitements thermiques

En traction

Le refroidissement à l'eau offre les meilleures performances (environ 10 MPa). Le refroidissement à l'huile donne des résultats intermédiaires. Le refroidissement à l'air présente les performances les plus faibles (environ 6 MPa).

En compression

Le refroidissement à l'eau et à l'huile présente des comportements similaires jusqu'à la rupture. Le traitement à l'eau permet une contrainte légèrement plus élevée (environ 17 MPa). La rupture survient plus tardivement avec le traitement à l'eau.

Une taille de graine inférieure à 2 mm est optimale pour les propriétés mécaniques. Le refroidissement à l'eau offre les meilleures performances mécaniques. Les propriétés de traction et de compression sont fortement influencées par les paramètres de traitement.

CHAPITRE IV : Optimisation numérique

IV.1 Introduction

Après avoir exposé les fondements théoriques de la méthodologie des plans d'expériences (DoE) et de l'optimisation dans le chapitre précédent, ce cinquième chapitre est entièrement dédié à **l'application pratique et à l'implémentation numérique** via le logiciel **MODDE 5**. L'objectif ici est de concrétiser notre démarche afin de modéliser et d'optimiser les performances de la zone de recouvrement étudiée.

Ce chapitre constitue le cœur opérationnel de notre étude statistique. Sans revenir sur les concepts théoriques déjà établis, nous nous concentrons exclusivement sur le traitement informatique des données, la configuration des paramètres et l'extraction des solutions optimales. À travers un cheminement séquentiel et logique, illustré par des captures d'écran directes du logiciel, nous détaillerons chaque phase clé de cette simulation : de la définition des facteurs d'entrée et des réponses, jusqu'à la génération des surfaces de réponse en trois dimensions .

Cette approche purement logicielle nous permettra de valider visuellement et statistiquement la robustesse de nos modèles, avant de présenter les résultats optimaux finaux qui garantiront la performance et la durabilité de la structure

IV.2 Approche méthodologique et modélisation statistique via le logiciel MODDE 5

L'optimisation des systèmes complexes en ingénierie requiert une approche hautement structurée afin de surmonter la complexité des calculs et d'obtenir des prédictions d'une grande précision. C'est dans ce cadre rigoureux que s'inscrit la méthodologie des plans d'expériences (Design of Experiments-DoE), une discipline mathématique et statistique qui permet d'organiser, de planifier et d'analyser rationnellement les essais. Pour mettre en œuvre cette démarche de manière optimale, nous avons eu recours au logiciel **MODDE 5**, une plateforme informatique de référence mondiale, développée spécifiquement pour la modélisation, le criblage, et l'optimisation des processus industriels et scientifiques.

Le logiciel **MODDE 5** se distingue par sa capacité à traduire des comportements physiques ou mécaniques en modèles mathématiques polynomiaux explicites. En s'appuyant sur des méthodes de régression avancées, telles que la régression linéaire multiple (MLR) ou la méthode des moindres carrés partiels (PLS), il permet d'établir des corrélations mathématiques strictes entre les variables d'entrée (les facteurs contrôlés du système) et les variables de sortie (les réponses de performance). En intégrant ces outils mathématiques, le logiciel offre une cartographie complète du domaine d'étude. Cela permet d'évaluer non seulement les effets principaux de chaque facteur pris individuellement, mais aussi et surtout leurs interactions mutuelles, qui

restent souvent invisibles lors des approches d'optimisation traditionnelles de type "un facteur à la fois". Dans le cadre de cette étude, l'exploitation de MODDE 5 repose principalement sur la méthodologie des surfaces de réponse (Response Surface Methodology - RSM). Cette technique avancée permet de générer des graphiques tridimensionnels et des diagrammes de contours (contour plots) indispensables pour visualiser l'évolution des critères mécaniques en fonction des variations géométriques appliquées. De plus, le logiciel procède à des validations statistiques rigoureuses, notamment à travers l'analyse de la variance (ANOVA), afin de vérifier la représentativité, la robustesse et la significativité des modèles ajustés, garantissant ainsi la fiabilité absolue des prédictions numériques.

L'objectif ultime de cette démarche d'optimisation statistique est de résoudre un problème d'arbitrage sous contraintes. Grâce à son algorithme d'optimisation basé sur la fonction de désirabilité, MODDE 5 explore de manière itérative l'espace des solutions possibles pour identifier la combinaison exacte et optimale des paramètres. Cette configuration idéale permet de maximiser la tenue globale de l'assemblage tout en minimisant les concentrations de contraintes et les risques de défaillance structurelle.

IV.3 Définition et rôle du logiciel MODDE 5

MODDE 5 (MODélisation et Design des Expériences) est un logiciel reconnu dans le monde entier, qui se concentre sur la méthode des plans d'expériences (Design of Experiments - DoE) et l'amélioration avancée des processus dans les domaines industriels et scientifiques. Créé par l'entreprise Umetrics, cet outil statistique aide à rendre les campagnes d'essais plus efficaces, à modéliser les relations mathématiques compliquées entre les variables et à identifier précisément les meilleures conditions de fonctionnement d'un système

IV.4 Les fonctionnalités principales du logiciel

➤ Génération de matrices de plans d'expériences

Le logiciel permet de planifier un nombre minimal d'essais tout en extrayant un maximum d'informations scientifiques. Il propose différents types de plans adaptés aux objectifs de l'étude (Plans factoriels complets ou fractionnaires, plans de criblage, plans composites centrés, ou plans de Box-Behnken).

➤ **Modélisation mathématique et régression**

MODDE 5 utilise des algorithmes statistiques avancés tels que la **régression linéaire multiple (MLR)** ou la méthode des **moindres carrés partiels (PLS)**. Ces outils permettent de traduire les données expérimentales brutes en modèles polynomiaux prédictifs (équations mathématiques).

➤ **Analyse de la variance et diagnostic (ANOVA)**

Il intègre des outils rigoureux pour évaluer la qualité et la robustesse des modèles ajustés. Le diagnostic repose principalement sur deux indicateurs clés :

- **R^2 (Fit)** : Mesure la qualité de l'ajustement du modèle par rapport aux points expérimentaux.
- **Q^2 (Predictability)** : Évalue la capacité réelle du modèle à prédire de futurs résultats.

➤ **Optimisation par surfaces de réponse (RSM)**

Le logiciel génère des graphiques tridimensionnels (Surfaces de réponse) et des diagrammes de contours (Contour Plots). Grâce à son algorithme basé sur la fonction de désirabilité, il permet de résoudre des problèmes multicritères et d'identifier le compromis géométrique ou thermique parfait sous les contraintes fixées par l'utilisateur.

IV.5 Étapes de mise en œuvre et d'implémentation pratique sur MODDE 5

Afin d'assurer une transparence méthodologique et d'illustrer de manière concrète le déroulement pratique de notre démarche, nous présentons dans cette section les principales étapes de configuration exécutées sur le logiciel **MODDE 5**. Ce cheminement séquentiel permet de suivre le passage de la formulation mathématique du problème jusqu'à l'extraction des résultats optimaux.

Les captures d'écran présentées ci-après décrivent visuellement les phases clés de cette implémentation dans le tableau qui suit :

Table IV.1 Matrice de l'analyse expérimentale et résultats des essais de traction et de compression.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	size	treatment	traction	compresion
1	1	N1	6	Incl ▼	1	1	7,5	9,5
2	2	N2	9	Incl ▼	1	2	9	16
3	3	N3	11	Incl ▼	1	4,18	10	17,8
4	4	N4	3	Incl ▼	2	1	7	9,2
5	5	N5	8	Incl ▼	2	2	7,3	9,5
6	6	N6	7	Incl ▼	2	4,18	8	10
7	7	N7	5	Incl ▼	3	1	6	6,8
8	8	N8	12	Incl ▼	3	2	6,4	7,3
9	9	N9	10	Incl ▼	3	4,18	6,9	7,8
10	10	N10	1	Incl ▼	2	1	7	9,2
11	11	N11	4	Incl ▼	2	1	7	9,2
12	12	N12	2	Incl ▼	2	1	7	9,2

- Ce tableau présente la matrice des essais expérimentaux introduite dans le logiciel MODDE 5. Il regroupe les 12 configurations testées en combinant les facteurs d'entrée (la taille des grains et le traitement thermique) associés aux réponses mécaniques mesurées (résistance à la traction et à la compression) pour le PEHD recyclé.
- Ces données brutes servent de base de référence essentielle pour la construction des modèles mathématiques, la validation statistique (R^2 et Q^2) et l'optimisation ultérieure du matériau.

Tableau IV.2 : Résultats de l'optimisation numérique multicritère et recherche des conditions optimales sous MODDE.

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1 size	Free		1	3	1 traction	Maximize	1	9,36175	9,73962	
2 treatment	Free		1	4	2 compresion	Maximize	1	15,1945	16,2071	

Iteration: 5000	Iteration slider: <input type="text"/>
-----------------	--

	1	2	3	4	5	6
	size	treatment	traction	compresion	iter	log(D)
1	1,0004	3,9999	9,4721	15,5298	3878	-0,3239
2	1,0001	3,999	9,4722	15,5303	4967	-0,3244
3	1	4	9,4726	15,5314	2600	-0,3259
4	1,0001	4	9,4725	15,531	4446	-0,3253
5	1	4	9,4726	15,5314	5000	-0,3258
6	1,0004	3,9999	9,4721	15,5298	3878	-0,3239
7	1	4	9,4726	15,5314	3628	-0,3258
8	1	4	9,4726	15,5314	3628	-0,3258

Ce tableau regroupe les valeurs optimisées des paramètres (**size**, **treatment**) permettant de maximiser les contraintes étudiées, selon les critères fixés.

Les résultats sont issus d'un processus d'optimisation numérique, utilisant des modèles ajustés sur les simulations initiales. Ce tableau présente les résultats d'une optimisation numérique réalisée avec le logiciel **MODDE**, visant à **maximiser** simultanément deux contraintes mécaniques :

- **Traction** (contrainte de traction maximale)
- **Compresion** (contrainte de compression maximale)

IV.6 Explications des paramètres

- **Size** : dimension/taille du paramètre, variant de 1 à 3.
- **treatment** : niveau du traitement appliqué, variant de 1 à 4.
- **Traction** : valeur obtenue pour la contrainte de traction maximale (colonne 3).
- **compresion** : valeur obtenue pour la contrainte de compression maximale (colonne 4).
- **iter** : nombre d'itérations de l'algorithme d'optimisation pour atteindre la solution.
- **Log(D)** : critère de désirabilité logarithmique, indicateur de la qualité de la solution (plus proche de zéro, meilleure est la désirabilité).

IV.7 Analyse des résultats

- **Tendance générale**
 - Les solutions optimales sont toutes obtenues pour la valeur de size minimale (égale à 1) et la valeur de treatment maximale (égale à 4).

CHAPITRE IV: Optimisation numérique

- Cela confirme que pour maximiser ces contraintes, il faut réduire le paramètre *size* au minimum et augmenter le paramètre *treatment* au maximum dans les limites fixées.
- Valeurs maximales atteintes
 - La contrainte de traction maximale obtenue est d'environ 9,4726.
 - La contrainte de compression maximale obtenue est d'environ 15,5314.
- Stabilité de l'optimisation
 - Les différentes lignes du tableau montrent des variations très faibles autour des valeurs optimales (comme 1,0001 ou 3,9999), ce qui indique une convergence stable de l'algorithme.
 - Le critère log(D) reste quasiment constant (autour de -0,3259), ce qui confirme la robustesse de la solution trouvée.

Ce tableau montre que l'optimisation numérique recommande d'utiliser la valeur de *size* minimale et la valeur de *treatment* maximale autorisées pour maximiser les performances critiques. Les résultats sont cohérents et démontrent que, dans la plage étudiée, la combinaison de ces deux réglages améliore significativement la tenue mécanique.

Tableau IV.3 : Coefficients de régression et indicateurs de performance du modèle pour la contrainte de comparaison maximale

	1	2	3	4	5
1	compresion	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	10,5532	0,537961	1,07671e-008	1,21696
3	siz	-3,56667	0,717989	0,000772463	1,62422
4	tre	1,4116	0,586483	0,0394498	1,32673
5					
6	N = 12	Q2 =	0,481	Cond. no. =	1,5711
7	DF = 9	R2 =	0,772	Y-miss =	0
8		R2 Adj. =	0,721	RSD =	1,7587
9				Conf. lev. =	0,95

- Ce tableau liste les coefficients du modèle mathématique prédictif pour la contrainte de compression maximale (compresion), en fonction du facteur de taille (size) et du niveau de traitement (treatment).

CHAPITRE IV: Optimisation numérique

- Les signes des coefficients indiquent l'influence de chaque paramètre :
 - Le paramètre **size** possède un coefficient négatif (-3,56667), ce qui signifie qu'une augmentation de la taille entraîne une forte diminution de la résistance à la compression (effet hautement significatif avec une valeur de $P = 0,00077$).
 - Le paramètre **treatment** possède un coefficient positif (1,4116), ce qui signifie qu'une augmentation du traitement tend à augmenter la résistance à la compression (effet statistiquement significatif avec une valeur de $P = 0,0394$).

Le modèle mathématique proposé est :

$$\text{Compresion} = 10,5532 - 3,56667 * \text{siz} + 1,4116 * \text{tre}$$

Où :

- **siz** : la taille (size)
- **tre** : le niveau de traitement (treatment)

Tableau IV.4 : Coefficients de régression et indicateurs de performance du modèle pour la contrainte de traction maximale.

	1	2	3	4	5
1	traction	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	7,62228	0,106887	1,05998e-013	0,241798
3	siz	-1,2	0,142657	1,47902e-005	0,322715
4	tre	0,650364	0,116528	0,00034243	0,263607
5					
6	N = 12	Q2 =	0,807	Cond. no. =	1,5711
7	DF = 9	R2 =	0,919	Y-miss =	0
8		R2 Adj. =	0,901	RSD =	0,3494
9				Conf. lev. =	0,95

- Ce tableau donne les coefficients du modèle pour la contrainte de traction maximale.
- L'effet des paramètres est linéaire, et l'influence de chaque facteur est statistiquement hautement significative.

Le modèle mathématique proposé est :

$$\text{Traction} = 7,62228 - 1,2 * \text{siz} + 0,650364 * \text{tre}$$

Ou:

siz : la taille (size)

tre : le niveau de traitement (treatment)

IV.8 Analyse et optimisation de diagramme de contour

- Un diagramme de contours, aussi appelé graphique de contour, montre en 2D des lignes qui relient les endroits où la variable que l'on examine (comme la température, la pression, la vitesse ou le rendement) a la même valeur.
- Ces graphiques sont très pratiques pour voir comment un système ou un modèle réagit selon deux variables continues. Ils aident à repérer rapidement les zones où la performance est optimale ou critique.
- Ils sont créés à partir de modèles modifiés (comme la régression linéaire ou des modèles de simulation) et sont utilisés pour examiner comment deux paramètres ensemble affectent la réponse que l'on étudie.

IV.8.1 Analyse via les contours

Les contours permettent de repérer les zones où la fonction objectif, comme le rendement, le coût ou la perte, atteint un maximum, un minimum ou des points de selle. L'analyse de la forme et de la courbure des contours nous montre si la solution optimale est stable ou sensible : des contours serrés signifient que la réponse change beaucoup, alors que des contours espacés indiquent une réponse moins sensible.

Le type de point stationnaire (optimum local, optimum global ou point de selle) peut être identifié en analysant la matrice hessienne du modèle de réponse, ainsi qu'en observant la forme des courbes de niveau autour du point critique.

IV.8.2: Optimisation à partir des contours

Les diagrammes de contours aident à améliorer les paramètres en montrant clairement les zones où les valeurs sont les meilleures, de manière visuelle.

En réalité, on ajuste un modèle (souvent du type quadratique) qui relie la réponse aux variables, puis on utilise les courbes de niveau pour prédire et identifier les points optimaux.

Les méthodes graphiques, comme les diagrammes de contours, sont souvent utilisées avec des méthodes analytiques, comme la résolution des dérivées partielles ou le calcul des valeurs propres de la Hessienne, afin de vérifier le type d'optimum et d'améliorer la recherche.

-L'utilisation de plans d'expériences et d'algorithmes d'optimisation (par exemple : Les méthodes comme le GPS-PSO et les plans d'expériences permettent de diminuer le nombre de simulations à exécuter tout en parcourant efficacement l'espace des paramètres.

IV.8.3 Exemple

Dans cette étude, on a fait des simulations numériques pour comprendre comment les grains de PEHD se comportent quand ils subissent des forces de compression et de traction. Les résultats ont été présentés sous forme de diagrammes de contours pour trouver les combinaisons de paramètres qui donnent les contraintes les plus élevées ou les plus basses.

L'étude de ces diagrammes permet de trouver facilement les zones où les contraintes mécaniques sont très importantes et celles où elles sont très faibles. Cette méthode permet de simplifier l'ajustement des formes et des conditions de travail des particules de PEHD.

IV.8.4 Avantages

L'usage des diagrammes de contours pour analyser la compression et la traction des grains de PEHD offre plusieurs bénéfices :

- ✓ Une compréhension claire de l'effet global des paramètres analysés.
- ✓ Détection rapide des zones à forte et faible contrainte ;
- ✓ Aide à l'optimisation des propriétés des granulats de PEHD ;
- ✓ Diminuer le nombre de simulations nécessaires en explorant plus efficacement le domaine de conception.
- ✓ Amélioration de la compréhension et du contrôle des résultats obtenus par le calcul numérique.

IV.8.5 Analyse de tendances

1. L'influence de la taille des grains et du processus de traitement :

La compression devient de moins en moins importante quand les grains se font plus grands. Cependant, elle augmente lorsque le niveau de traitement augmente. Les valeurs de contrainte vont de 14,57 pour les grains petits qui sont liés à des traitements forts, jusqu'à 6,57 pour les grains grands qui sont associés à des traitements plus faibles.

2. Zones critiques

Les zones rouges, orange et jaunes en haut à gauche du diagramme montrent les contraintes de compression les plus importantes. Ces zones correspondent aux situations les plus difficiles pour les grains de PEHD, où les contraintes mécaniques sont les plus importantes.

3. Zones favorables

Les zones bleues situées en bas à droite du diagramme indiquent les contraintes de compression les moins importantes. Ces configurations sont donc les meilleures pour réduire les efforts de compression dans le matériau.

IV.8.6 Optimisation

Pour diminuer la contrainte de cisaillement maximale et rendre l'assemblage plus fiable, il est mieux d'augmenter la longueur de recouvrement et/ou l'épaisseur du collage, autant que possible.

- Effet combiné

L'effet n'est pas tout à fait direct : quand on augmente les deux paramètres en même temps, cela diminue davantage la contrainte que si on augmente seulement l'un d'eux. Ce diagramme permet de repérer facilement les combinaisons de longueur et d'épaisseur qui réduisent le cisaillement maximal dans l'adhésif, aidant ainsi à choisir une conception plus solide et plus fiable.

IV.9 Analyse et optimisation de diagramme de contour de compression :

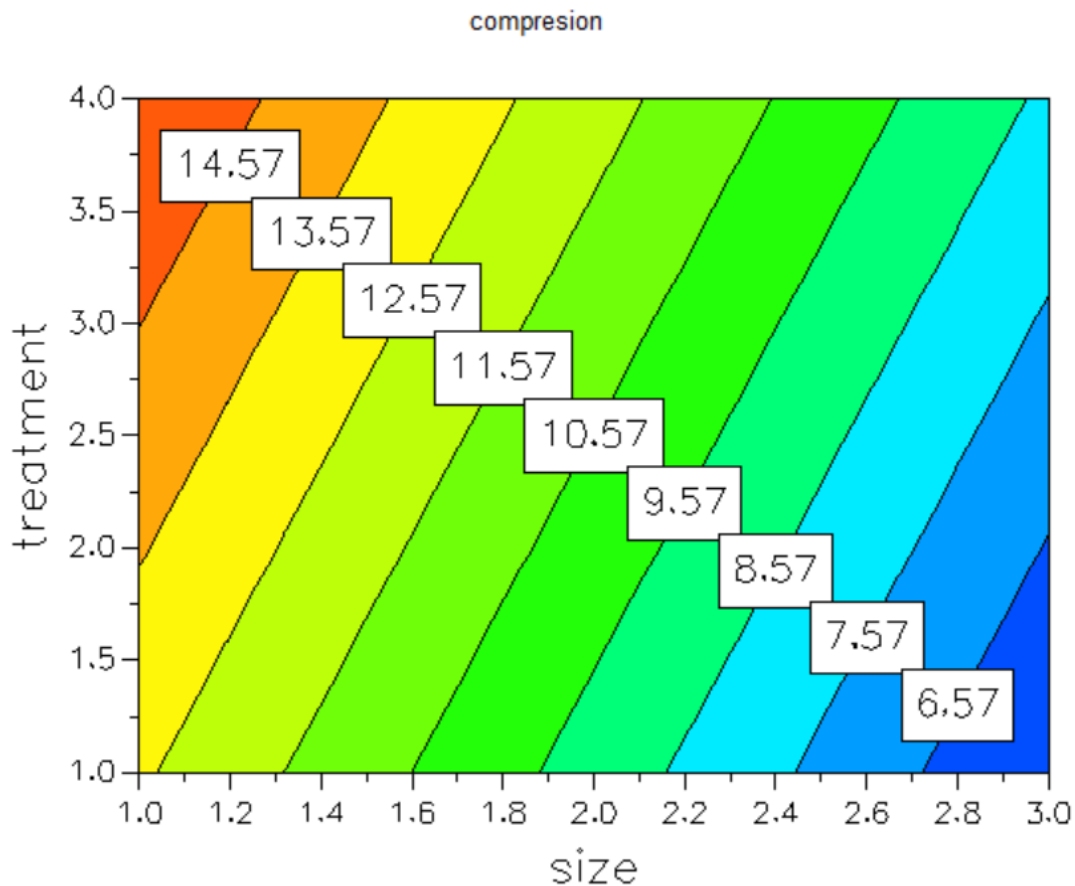


Figure IV.1 : Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du traitement et de la dimension des particules.

La figure représente un diagramme 1 de contours montrant la résistance à la compression (« Compression ») en fonction de deux paramètres principaux :

- **Axe horizontal (x) : taille (Size)**
- **Axe vertical (y) : traitement (Treatment)**

IV.9.1 Contours et couleurs :

Chaque courbe de niveau (contour) relie les points où la valeur de la résistance à la compression est identique. Les valeurs sont indiquées sur les courbes (par exemple : 14.57, 13.57, 12.57, 11.57, 10.57, 9.57, 8.57, 7.57 et 6.57).

- Les **couleurs chaudes** (orange, jaune) correspondent à des valeurs de compression élevées.
- Les **couleurs froides** (vert, bleu) correspondent à des valeurs de compression plus faibles.

IV.9.2 Tendances observées :

- Lorsque la taille (Size) augmente (vers la droite), la résistance à la compression diminue progressivement.
- Lorsque le traitement (Treatment) augmente (vers le haut), la résistance à la compression augmente.
- Les zones situées en haut à gauche (faible taille et traitement élevé) présentent les valeurs de compression les plus importantes.
- Les zones situées en bas à droite (grande taille et faible traitement) présentent les valeurs les plus faibles.

IV.9.3 Interprétation technique et Optimisation :

Pour maximiser la résistance à la compression, il est recommandé de travailler avec une faible taille et un niveau de traitement élevé. Cette combinaison permet d'obtenir les meilleures performances mécaniques en compression.

IV.9.4 Effet combine

Les lignes de contour sont presque parallèles, ce qui suggère que les deux facteurs influencent la réponse de manière relativement régulière dans le domaine étudié. Toutefois, la légère inclinaison des courbes indique que l'effet du traitement dépend partiellement du niveau de taille, mettant en évidence une interaction modérée entre les deux paramètres.

IV.10 Analyse et optimisation de diagramme de contour de Traction :

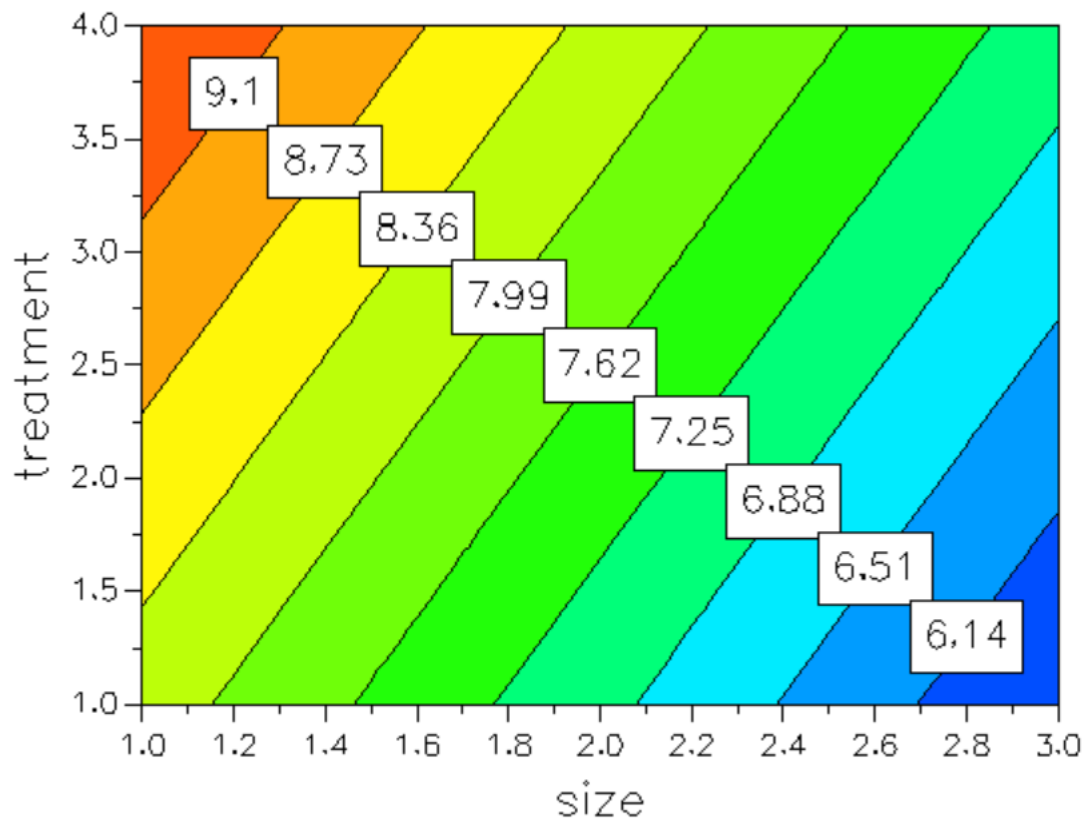


Figure IV.2 : Modélisation par surface de réponse du [Variable] en fonction des conditions de traitement et de la taille

La figure représente un diagramme 2 de contours montrant la résistance à la traction (« Tensile Strength ») en fonction de deux paramètres principaux :

- **Axe horizontal (x) : taille (Size)**
- **Axe vertical (y) : traitement (Treatment)**

IV.10.1 Contours et couleurs

Chaque courbe de niveau (contour) relie les points présentant la même valeur de résistance à la traction. Les valeurs indiquées sur les courbes varient de **6,14** à **9,10**.

- Les couleurs chaudes (orange et jaune) correspondent aux valeurs les plus élevées de résistance à la traction.
- Les couleurs froides (vert, bleu clair et bleu foncé) correspondent aux valeurs les plus faibles.

IV.10.2 Tendances observées :

- Lorsque la taille (Size) augmente (de gauche à droite), la résistance à la traction diminue progressivement.
- Lorsque le traitement (Treatment) augmente (de bas en haut), la résistance à la traction augmente.
- Les valeurs maximales de résistance à la traction sont observées dans la région située en **haut à gauche**, correspondant à une faible taille et à un niveau de traitement élevé.
- Les valeurs minimales sont localisées dans la région bas à droite, correspondant à une grande taille et à un faible niveau de traitement.

IV.10.3 Interprétation technique et Optimisation :

Pour maximiser la résistance à la traction, il est préférable d'utiliser des particules de faible taille associées à un traitement élevé. Cette combinaison favorise une meilleure cohésion du matériau et améliore sa capacité à résister aux efforts de traction.

IV.10.4 Effet combine

Les courbes de contour présentent une orientation régulière et quasi parallèle, indiquant que les deux facteurs influencent significativement la résistance à la traction. La légère courbure observée suggère également l'existence d'une interaction entre la taille et le traitement, où l'effet d'un facteur dépend partiellement du niveau de l'autre facteur.

IV.10.5 Résultat et perspectives et discussion

Il faut préciser que les résultats obtenus grâce au logiciel MODDE 5 sont jugés plus précis et plus fiables que ceux obtenus en simplement lisant les diagrammes de contours. En effet, le modèle MODDE 5 s'appuie sur une analyse statistique approfondie qui inclut les coefficients du modèle, les valeurs de significativité (p-value), les interactions entre les facteurs et des indicateurs de qualité comme R^2 et Q^2 . Cette méthode permet de mesurer clairement l'effet de chaque paramètre sur le résultat analysé et de trouver les meilleures conditions avec une grande fiabilité.

Au contraire, le diagramme de contours est principalement un outil graphique qui permet de visualiser les tendances générales et les zones favorables du domaine expérimental. Bien qu'il aide à comprendre les résultats, il ne permet pas tout seul d'évaluer si les effets observés sont statistiquement significatifs. Par conséquent, les conclusions de cette étude ont été tirées à partir des résultats du logiciel MODDE 5, et les diagrammes de contours ont servi de support pour illustrer et vérifier visuellement les tendances observées.

IV.10.6 Conclusion

Ce diagramme 1 de contours permet d'identifier rapidement les combinaisons optimales de taille et de traitement pour améliorer la résistance à la compression. Les résultats montrent que les meilleures performances sont obtenues pour des valeurs faibles de taille associées à des niveaux élevés de traitement, tandis que les combinaisons de grande taille et faible traitement conduisent aux résistances les plus faibles. Ainsi, cette analyse constitue un outil d'aide à la décision pour optimiser les conditions de fabrication et garantir de meilleures propriétés mécaniques du matériau étudié.

Ce diagramme 2 de contours permet d'identifier les conditions optimales pour améliorer la résistance à la traction du matériau étudié. Les résultats montrent qu'une diminution de la taille combinée à une augmentation du niveau de traitement conduit aux meilleures performances mécaniques, avec une résistance maximale d'environ **9,10**. À l'inverse, les faibles valeurs de traitement associées aux grandes tailles génèrent les performances les plus faibles. Ainsi, cette analyse constitue un outil efficace pour orienter le choix des paramètres de fabrication et optimiser les propriétés mécaniques du matériau.

L'utilisation du logiciel MODDE 5 a permis d'analyser correctement les résultats des expériences, de trouver les paramètres qui ont le plus d'impact sur la réponse observée et de confirmer que le modèle statistique est fiable. Cet outil permet ainsi de mieux comprendre les résultats des expériences et d'améliorer efficacement le processus.

CONCLUSION GENERALE

Arrivés au terme de ce travail de recherche dédié à l'optimisation de la production et des performances mécaniques de polymères recyclés à partir de produits en fin de vie, plusieurs conclusions majeures peuvent être dégagées. Ce projet de fin d'études, mené dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master, a permis de lier les exigences de la gestion industrielle et du tri des déchets aux réalités scientifiques de la science des matériaux et de la modélisation numérique.

Dans un premier temps, l'étude de l'état de l'art a mis en lumière la structure macromoléculaire et les propriétés du PEHD, justifiant son immense succès industriel tout en révélant sa vulnérabilité face aux cycles de valorisation et de recyclage. L'analyse de la chaîne de gestion au second chapitre a permis de cartographier les verrous technologiques du processus de valorisation. Nous avons démontré l'impact capital de la qualité du tri en amont – notamment la supériorité du tri sélectif et des protocoles de séparation – ainsi que la nécessité de contrôler rigoureusement les paramètres de prétraitement pour garantir des propriétés optimales en vue d'une réintégration industrielle.

L'approche expérimentale et analytique a concrétisé ces observations en évaluant l'influence réelle des paramètres physiques (comme la granulométrie ou les traitements thermiques) sur les performances mécaniques des matériaux. Les essais ont révélé qu'une réduction de la taille des particules et un mode de refroidissement adapté (notamment le refroidissement à l'eau) permettent d'obtenir une meilleure cohésion et de maximiser la résistance mécanique face aux contraintes de traction et de compression, devançant nettement les autres modes de traitement.

Enfin, l'optimisation et la validation numérique ont permis de donner une dimension prédictive et rigoureuse à ce travail. À travers l'utilisation des logiciels MODDE 5 pour la modélisation statistique et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM), ainsi qu'Abaqus pour l'analyse numérique avancée des structures et des comportements mécaniques (comme l'optimisation des assemblages adhésifs), nous avons pu valider mathématiquement les tendances observées. Les modèles générés ont confirmé la convergence stable vers des paramètres géométriques et physiques idéaux, permettant de maximiser la tenue mécanique globale.

En somme, ce travail démontre qu'en maîtrisant les étapes de tri en amont, les paramètres physiques de transformation et en s'appuyant sur des outils de simulation numérique performants, il est tout à fait possible de concevoir et d'optimiser des structures polymères à haute valeur ajoutée, ouvrant ainsi la voie à des applications techniques et industrielles exigeantes.

PERSPECTIVES

Bien que les objectifs initiaux de ce mémoire aient été atteints, cette étude ouvre d'intéressantes perspectives pour de futures recherches :

1 Approfondissement des modèles numériques : Développer sous Abaqus des modèles de comportement plus complexes (comportement viscoélastique ou endommagement

progressif) pour simuler le comportement à long terme des assemblages sous charges cycliques ou dynamiques.

2 Optimisation statistique multi-objectifs : Pousser l'utilisation de MODDE 5 pour croiser un plus grand nombre de facteurs de formulation (additifs, compatibilisants) afin d'obtenir le compromis parfait entre coût de production et résistance mécanique.

3 Analyse de la fatigue et du vieillissement : Étudier l'évolution des propriétés mécaniques et rhéologiques des matériaux après une exposition prolongée à des conditions environnementales sévères (variations de température, humidité).

4 Automatisation et Smart Sorting : Modéliser l'intégration de capteurs connectés et d'algorithmes d'intelligence artificielle en temps réel sur les lignes de tri industriel pour optimiser automatiquement la pureté des flux de matériaux entrants.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Wikipedia contributors. (n.d.). Polyethylene. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>.
- [2] Wikipedia contributors. (n.d.). Polyethylene. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>.
- [3] Peacock, A. J. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structures, Properties, and Applications*. New York: CRC Press.
- [4] D. G. Dikobe, A. S. Luyt, Comparative study of the morphology and properties of PP/LLDPE/wood powder and MAPP/LLDPE/wood powder polymer blend composites,
- [5] GILAC. (s.d.). Le PEHD alimentaire. Consulté le 29 mai 2026, sur <https://www.gilac.com/fr/content/36-le-pehd-alimentaire>
- [6] Ramenetessciences. (2017, 2 mai). Le polyéthylène haute densité (PEHD). Consulté le 29 mai 2026, sur <https://ramenetessciences.wordpress.com/2017/05/02/le-polyethylene-haute-densite-pehd/>.
- [7] Groupe PolyAlto. (s.d.). Polyéthylène HDPE. Consulté le 29 mai 2026, sur <https://www.polyalto.com/fr/catalogue/produits/polyethylene-hdpe>.
- [8] ACA Plastiques & Mécaniques. (s.d.). Quelle est la différence entre le PEHD 500 et le PEHD 1000. Consulté le 29 mai 2026, sur <https://www.acaplastiques.com/details-quelle+est+la+diff%C3%A9rence+entre+le+pehd+500+et+le+pehd+1000+entreprise+d+usine+de+pehd+dans+le+var-100328.html>.
- [9] Biovie. (2017). Quel est le plastique le plus sûr en contact alimentaire ? PEHD vs PET. Consulté le 29 mai 2026, sur <https://www.biovie.fr/fr/blog/quel-est-plastique-le-plus-sur-en-contact-alimentaire-n732>.
- [10] Agrishade. (s. d.). High-density polyethylene (HDPE) explained. Consulté le 29 mai 2026, sur <https://www.agrishade.com/fr/high-density-polyethylene-hdpe-explained/>.
- [11] Ministère de la Transition écologique, *Le tri à la source et la sensibilisation au recyclage*, disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/>
- [12] PAPREC, *Les étapes du recyclage des plastiques*, disponible sur : <https://www.paprec.com/>
- [13] Goodship, V. (2007). *Introduction to Plastic Recycling*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK. Traite les procédés de recyclage des plastiques, incluant les étapes de lavage et les paramètres influençant la qualité du matériau recyclé
- [14] Trevor M. Letcher. (2020). *Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions*. Academic Press
- [15] Uri Zoller & Paul Sosis (Eds.). (2008). *Handbook of Detergents, Part F: Production*. CRC Press / Taylor & Francis. Cet ouvrage décrit les agents tensioactifs,

les détergents et les facteurs influençant leur efficacité dans les procédés industriels de nettoyage

- [16] Brandrup, J., Bittner, M., Michaeli, W., & Menges, G. (1996). *Recycling and Recovery of Plastics*. Hanser Publishers.
- [17] Letcher, T. M. (2020). *Plastic Waste and Recycling*. Academic Press.
- [18] Afriadi, D., & Muhammad Yasin, F. (2023). Optimization of natural catalysts in oil production from plastic waste pyrolysis. *Jurnal Biosains Pascasarjana*.
- [19] Abdulmohsen ALBEDAH, Sohail Mohamed MAZHERALIKHAN, Bachir BACHIR BOUIADJRA, Bel Abbès BACHIR BOUIADJRA, Faycal BENYAHIA (2017)"Effect of the patch length on the effectiveness of one-sided bonded composite repair for aluminum panels"S0143-7496(17)30215-4; <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.11.012>.
- [20] Alali, S.A., Aldaihani, M.K., & Alanezi, K.M. (2023). Plant design for the conversion of plastic waste into valuable chemicals (alkyl aromatics). *Applied Sciences*.
- [21] Bachir Bachir Bouiadjra, F., Benyahia, A., Albedah, B.A., Bel Abbès Bachir Bouiadjra, & SMA Khan (2015). Comparison between composite and metallic patches for repairing aircraft structures of aluminum alloy 7075 T6. *International Journal of Fatigue*, 80, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.05.018>
- [22] Bachir Bachir Bouiadjra, H., Achache, M., Titah, M., Bel Abbès Bachir Bouiadjra, Khalfi, Y., Djaafar Ait Kaci, & Zahi, R. (2024). Comparative study between numerical analysis and experimental study of the location of stiffeners in plates with a set of circular notches. 67 (09/2024), 488-502. DOI: 10.5281/zenodo.13853592.
- [23] Bachir Bachir Bouiadjra, Y., Khalfi, M., & Titah, M. (2024). Analysis of the effects of disbonding on shear stresses in bonded assemblies subjected to mechanical loads. 67 (08/2024), 441-457. DOI: 10.5281/zenodo.13365359.
- [24] Bechikhi Youcef, Bachir Bachir Bouiadjra, Bouzian Mohamed Mokhtar, Bel abbès Bachir Bouiadjra, Smail Benbarek. Distribution of macrohardness in polypropylene/Talc microcomposite , Volume 21:4 , Page 141, Polish Society Of Composite Materials.
- [25] Dany, H., Dhong, W.W., Jiata, K.W., Leong, T.K., Yuhana, N.Y., & Tan, G. (2021). Deodorizing methods for recycled high-density polyethylene plastic wastes. *Materiale Plastique*.
- [26] de Jesus, T.W., Pasquini, D., & Benvenuti, T. (2023). Characterization of PS/PP/HDPE/LDPE polymer blend obtained from plastic waste collected on beaches in Ilhéus-Bahia, Brazil. *Polymers*, 15.
- [27] Díaz-Mendoza, J.M., Valles-Rosales, D.J., Park, Y.H., & Sabo, R.C. (2022). Micromechanical Modeling for Tensile Properties of Wood Plastic Composites: Use of Pruned Waste from Pecan Orchards as Sustainable Material for Reinforcement of Thermoplastic Composite. *Polymers*, 14
- [28] Elnaml, I., Liu, J., Mohammad, L.N., Wasiuddin, N.M., & Cooper, S.B. (2023). Developing sustainable asphalt mixtures using high-density polyethylene plastic waste material. *Sustainability*.
- [29] Faisal, R.M., Ardian, A., Khoiriyah, V., & Chafidz, A. (2021). Production of briquettes from a blend of HDPE (high-density polyethylene) plastic wastes and teak

(*Tectona grandis* Linn. f) sawdust using different natural adhesives as the binder. *Key Engineering Materials*, 882, 273-279.

[30] Ghodke, P.K., Ramanjaneyulu, B., Naithani, A., Vaishnav, S., & Mishra, S. (2020). Synthesis of pillared clay catalyst for the production of hydrocarbon fuel from plastic waste. *Social Science Research Network*

[31] Moshkbid, E., Cree, D.E., Bradford, L., & Zhang, W. (2024). Biodegradable Alternatives to Plastic in Medical Equipment: Current State, Challenges, and the Future. *Journal of Composites Science*

[32] Noori, Md. Tabish et al. "Utilisation of waste medicine wrappers as an efficient low-cost electrode material for microbial fuel cell." *Environmental Technology* 41 (2018): 1209 - 1218

[33] Nourddine Bachir Bouiadjra, F.S.B.Bouiadjra, B.B.Bouiadjra. (2024). ANALYSIS AND OPTIMISATION OF THE PARAMETERS OF AN EXPERIMENTAL TEST ON THE USE OF WAVES FOR THE DETECTION AND SIZING OF DEFECTS IN BONDED ALUMINIUM LAP JOINTS. Vol67 issue11/2024, 97-104. DOI: 10.5281/zenodo.14195712

[34] Otitoju, M.A., Olawoye, T., Abiola, S.S., Ahmed, S., & Okoma, O. (2023). Plastic waste management and recycling: a review. *Journal of Global Social Sciences*

[35] Petlitckaia, S., Barboni, T., Quilichini, Y., Tihay-Felicelli, V., & Santoni, P. (2024). Valorization of plastic HDPE and cork wastes in the design of composite materials. *Macromolecular Symposia*

[36] Sponza, D.T., & Öztekin, R. (2023). Removals of some high- and low-density polyethylene (HDPE and LDPE), polypropylene (PP) and polyvinyl chloride (PVC) microplastics using some microalgae types, energy production and energy recovery. *Molecular Sciences and Applications*.

[37] Sohail M.A. Khan Mohammed, Rachid Mhamdia, Abdulmohsen Albedah, Bel Abbes Bachir Bouiadjra, Bachir Bachir Bouiadjra, & Faycal Benyahia (2021). Fatigue crack growth in aluminum panels repaired with different shapes of single-sided composite patches. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 105, 102781. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102781>

[38] Scroggin, Jason. "Designing and Building with Plastic Waste." *112th ACSA Annual Meeting Proceedings, Disruptors on the Edge* (2024): n. pag

[39] Titah, M., & Hachemi, K. (2024). Improvement of human performance in healthcare systems by taking into account physician behavior. *Journal of Health Organization and Management*, 38(6), 888-904

[40] V.I, S., K, M., C, O., A, E., & J.R, D. (2022). The utilization of end-of-life plastics for the production of paver blocks: A waste management and disposal strategy. *International Journal of Civil, Environmental and Agricultural Engineering*

[41] Wani, T., Pasha, S.A., Poddar, S., & Balaji, H. (2020). A review on the use of high-density polyethylene (HDPE) in concrete mixture. *International Journal of Engineering Research and*, 9.

[42] Zhao, X., Yong, Y., Du, C., Guo, W., & Luo, D. (2022). Evaluation on production trend, compositions, and impact of plastic waste in Chengdu, southwestern China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 72, 1454-1462.

- [43] Rosato, D. V. (1998). *Extruding Plastics: A Practical Processing Handbook*. Springer, New York. DOI: 10.1007/978-1-4615-5793-7.
- [44] Silva, R. J. O., Graf, K., & Okimoto, M. L. L. R. (2025). *Plastic waste recycling: an overview of the mechanical, chemical, and thermal technologies*. Journal of Engineering and Applied Science, 72, 251
- [45] Suriati, G., et al. (2024). *Sustainable Solutions Through Innovative Plastic Waste Recycling Technologies*. Sustainability, 16(23), 10401.
- [46] Al-Salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2022). *Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review*. Progress in Energy and Combustion Science, 93, 101021. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101021>
- [47] Wang, Y., et al. (2026). *A short review of waste plastic chemical recycling by pyrolysis: From process parameters and catalytic mechanisms to product upgrading*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 196, 107710.
- [48] Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. Waste Management, 69, 24-58.
- [49] Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). *Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials*. Macromolecular Materials and Engineering, 293(4), 274–297
- [50] La Mantia, F. P. (2002). *Handbook of Plastics Recycling*. Rapra Technology Ltd Rémi Deterre, Gérard Froyer; Introduction aux matériaux polymères ; édition technique et documentation ; 1997
- [52] LE ROBERT, PAUL ROBERT, *Dictionnaire Le Robert en ligne*, 1951
- [53] SCRAPAD, *The global platform for buying and selling scrap and recyclable metals*, 2020, disponible sur: <https://scrapad.com/>
- [54] CITEO, *Le fonctionnement des centres de tri*, disponible sur : <https://www.citeo.com/>
- [55] VEOLIA, *Technologies de tri et recyclage des déchets*
- [56] Ministère de la Transition écologique, *Le tri à la source des déchets*, <https://www.ecologie.gouv.fr>
- [57] Ministère de la Transition écologique, *Gestion et tri des déchets*
- [58] STEINERT GmbH, *Technologies de tri automatique et de recyclage*, <https://steinertglobal.com>
- [59] RECYCLEYE, *Technologies de tri automatique des déchets par intelligence artificielle*, [en ligne], <https://recycleye.com/>
- [60] ADEME, *Recyclage et tri des plastiques*, disponible sur : <https://www.ademe.fr>

