

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 عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de Technologie
قسم الإلكترونيات
Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Thème :

**Etude et conception d'un séparateur électrostatique
pour le tri des fibres de carbone recyclées**

Présenté par :

- 1) Melle. Bentaieb Aya
- 2) Melle. Khelifi Achouak

Devant le jury :

Dr BOUDJELLA Fatima Zohra	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr AOUMER Djilali	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr MESSAFEUR Radjaa	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

Année Universitaire 2024/2025



Remerciements

Ce mémoire marque la fin d'un parcours, mais aussi l'aboutissement de plusieurs mois de travail, d'efforts, de doutes parfois, et de belles découvertes. Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance envers Allah, source de sagesse et de persévérance, qui nous a offert la force, la patience et la santé nécessaires pour mener à bien cette étude et atteindre cet objectif

Nous exprimons notre gratitude envers notre encadrant, dont la proposition de ce sujet a été déterminante pour la construction de notre réflexion. Nos remerciements vont également à Madame **MESSAFEUR Radjaa**, qui nous a accompagnés avec engagement et bienveillance tout au long de ce projet. Son sérieux, sa générosité et son sens des responsabilités ont été pour nous une aide précieuse. Malgré ses nombreuses sollicitations, elle a toujours trouvé le temps de nous guider et de nous conseiller.

Nous remercions sincèrement les membres du jury pour le temps qu'ils consacreront à l'analyse et à l'évaluation de ce travail. Leurs observations et conseils seront précieux pour approfondir notre réflexion et enrichir notre approche.

Nos remerciements vont également aux équipes du laboratoire de notre université, dont la coopération et la disponibilité ont été essentielles au bon déroulement de nos recherches.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous les enseignants et intervenants du UAT que j'ai eu l'occasion de rencontrer au cours de mon cursus. Leur engagement et la richesse de leur enseignement m'ont permis d'approfondir mes connaissances et de développer un esprit critique.

Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers nos familles, véritables piliers tout au long de notre parcours. Leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur confiance en nos capacités ont été une source précieuse de motivation. Sans eux, cette aventure n'aurait pas été possible.



Dédicace

Avant toute chose, je tiens à remercier Allah, source de toute sagesse et force, sans qui ce travail n'aurait pu voir le jour.

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassée, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À mon âme qui a été patiente, persévérante et qui a surmonté tous les obstacles pour atteindre ce moment tant attendu. La route n'a peut-être pas été facile, mais elle valait chaque pas et chaque nuit blanche

A mes parents, nulle dédicace n'est susceptible de vous exprimer mes profondes affections et mes immenses gratitudes pour tous les sacrifices que vous avez consentis pour mes éducation et mes études.

A mon frère achref et mes soeur Asma, wafaa, romaissa qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur

À mon ami aymen, merci du fond du cœur pour votre soutien moral et vos encouragements, et j'espère que votre chemin sera toujours éclairé par la connaissance et le succès.

À ma meilleure amie Kheira, merci pour ton amour et tes encouragements tout au long de mon parcours académique. Que votre cœur soit toujours rempli de joie et que tes rêves brillent aussi fort que les étoile.

Sans oublier mon binôme aya pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout ou long de ce travail.

Aux étudiants universitaires de Gaza qui sont décédés avant que l'histoire ne soit terminée, avant que leurs noms ne soient appelés le jour de la remise des diplômes, ils sont devenus une lumière inextinguible dans le ciel de la connaissance et de la dignité. Que la paix soit sur vos âmes pures, et notre rendez-vous avec Dieu ne sera pas oublié.

achouak



Dédicaces

À tous ceux qui sont chers, ceux à qui je dois mon succès :

À notre « Seigneur, Dieu tout puissant », merci dieu de m'avoir donné la vie, la foi, les prières exaucées pour m'y arriver.

À celui qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, et qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui car il est mon Père, celui dans les yeux duquel je vois la fierté de moi, mon modèle de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité. Grace à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier.

À celle dont ses paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, la première Femme Forte, courageuse qui a souffert sans nous laisser souffrir, celle qui m'a appris à être une fille forte et qui cherche toujours à achever ses objectifs à tout prix; celle qui m'a encouragé à poursuivre mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables. Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être ma Mère continueront d'éclairer mon chemin.

À mes chers témoins des étapes de ma vie, dans mon succès, joie, tristesse, mes sœurs ; je n'oublierai jamais vos encouragements permanents et soutiens moraux, votre présence dans mon cœur est un trésor précieux.

À mes amies , celles qui ont partagé mes rires, mes larmes, mes doutes et mes rêves durant ces cinq années .Merci d'avoir été des sœurs de cœur dans ce voyage parfois difficile, mais si riche .

À mon Binôme Achouak merci d'avoir toujours répondu présente avec sérieux et bonne humeur.

À tous les membres de ma grande famille, qui n'ont jamais cessé de me donner un coup de main, ce travail est le résultat de vos encouragements. Et à ma grande mère, pour sa tendresse et ses prières qui m'ont accompagnée dans chaque étape de ma vie.

Aux étudiants universitaires de Gaza qui sont décédés avant que l'histoire ne soit terminée, avant que leurs noms ne soient appelés le jour de la remise des diplômes, ils sont devenus une lumière inextinguible dans le ciel de la connaissance et de la dignité. Que la paix soit sur vos âmes pures, et notre rendez-vous avec Dieu ne sera pas oublié.

Et à moi-même,

Pour toutes ces fois où j'ai gardé la tête haute, même lorsque le poids était lourd à porter. Pour les moments de doute, de fatigue et de solitude traversés en silence. Pour chaque larme essayée, chaque nuit blanche endurée, et chaque échec transformé en leçon.

Pour ma persévérance, ma force tranquille et mon courage discret.

Aya

Table des matières

Table des Matières

Introduction Générale	1
CHAPITRE I :Généralité sur le recyclage de fibre de carbone.....	3
I.1 Introduction	4
I.2 Définition	4
I.3 Fabrication de fibre de carbone	5
I.3.1 Les fibres ex-PAN	5
I.3.2 Les fibres ex-brai	7
I.4 Caractéristiques physiques des fibres	7
I.5 Défis et limitations	8
I.6 Applications des fibres de carbone	9
I.6.1 Aéronautique, espace et défense	10
I.6.2 Industries diverses	10
I.6.3 Automobile	10
I.6.4 Génie civil	11
I.6.5 Sports et loisirs	11
I.6.6 Autres applications industrielles	11
I.7 Recyclage de fibre de carbone	11
I.7.1 Définition du Recyclage	11
I.7.2 Principe du Recyclage	12
I.7.3 Technique du Recyclage	12
I.7.3.1 Recyclage mécanique par broyage	12
I.7.3.2 Recyclage thermique	13
I.7.3.3 Recyclage chimique	15
I.8 Le défi du recyclage	16
I.9 Conclusion	16
CHAPITRE II :Étude et Simulation d'un nouveau Séparateur Electrostatique à Flux d'Air.....	17
II.1 Introduction.....	18
II.2 Séparateur électrostatique	18
II.3 Description	18
II.4 Principe de fonctionnement	21
II.5 Procédure expérimentale	21

II.6	Forces exercées sur les particules	22
II.6.1	La force électrostatique	22
II.6.2	La force gravitationnelle	23
II.6.3	La force de frottement	23
II.6.4	La force du flux d'air ascendant	24
II.7	Instrumentation et Méthodes de Mesure	24
II.7.1	Mesure de la température et de l'humidité relative	24
II.7.2	Mesure de la charge triboélectrique	25
II.7.3	Mesure de la masse granulaire	26
II.7.4	Souffleur électrique	27
II.7.5	Source Haute Tension	27
II.8	Les matériaux utilisés	28
II.8.1	Le Polycarbonate (PC)	28
II.8.2	Fibre de carbone recyclée	28
II.9	Étude de champs électrique	29
II.9.1	Modèle développé	30
II.9.2	Maillage	31
II.10	Conclusion	31
	CHAPITRE III :Résultats expérimentaux et analyse des données.....	32
III.1	Introduction	33
III.2	Techniques de mesure	33
III.2.1	Taux de récupération de produit	33
III.2.2	Taux de pureté de produit	33
III.3	Résultats et discussion de l'étude de champs	34
III.3.1	Résultats de simulation obtenus	34
III.3.2	Interprétation des résultats	36
III.4	Résultats et Discussion du dispositif de séparateur électrostatique	36
III.4.1	Fibre de carbone de taille 3mm	37
III.4.1.1	Influence de la haute tension positive / négative	37
a)	Interprétation des résultats	39
III.4.1.2	Influence de la haute tension négative/mise à la terre	41
a)	Interprétation des résultats	42
III.4.1.3	Influence de la haute tension positive /mise à la terre	44

a) Interprétation des résultats	45
III.4.1.4 Influence de la tension appliquée sur le taux de récupération et le taux de pureté	47
III.4.2 Fibre de carbone de taille 10mm	50
III.4.2.1 Influence de la haute tension positive / négative	50
a) Interprétation des résultats	52
III.4.2.2 Influence de la haute tension positive/mise à la terre	53
a) Interprétation des résultats	55
III.4.2.3 Influence de la haute tension négative/mise à la terre	57
a) Interprétation des résultats	58
III.4.2.4 Influence de la tension appliquée sur le taux de récupération et le taux de pureté	60
III.5 Conclusion	63
Conclusion Générale.....	65

Liste des Figures

Liste des Figures

CHAPITRE I : Généralité sur le recyclage de fibre de carbone

Figure I. 1: Fibre de carbone.....	4
Figure I. 2: Schéma de fabrication d'une bobine de fil polyacrylonitrile	5
Figure I. 3: Procède de mise en forme des fibres de carbone Ex-PAN	6
Figure I. 4: Description du procédé de fabrication d'une fibre de carbone ex-PAN.....	7
Figure I. 5: Schéma du principe du recyclage mécanique des composites par broyage.....	12
Figure I. 6: Fibres de carbonées recyclées par pyrolyse sur lit fluidisé	13

CHAPITRE II : Étude et Simulation d'un nouveau Séparateur Électrostatique à Flux d'Air

Figure II. 1: Schéma du séparateur électrostatique à flux d'air (Tinkercad)	20
Figure II. 2: Photographie de l'électrode plane.....	20
Figure II. 3: Thermo-hygromètre numérique modèle testo 625.....	24
Figure II. 4: Electromètre numérique Keithley modèle 6514	25
Figure II. 5: Cage de Faraday.....	25
Figure II. 6: Balance analytique électronique automatique	26
Figure II. 7: Un Souffleur électrique	27
Figure II. 8 : Alimentation haute tension continue (polarité positive ou négative).....	27
Figure II. 9: Aspect des granules de Polycarbonate (PC).	28
Figure II. 10:Fibre de carbone recyclée : (a) fibre de taille 3mm, (b) fibre de taille 10mm....	29
Figure II. 11: Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.....	30
Figure II. 12: Représentation 3D de séparateur électrostatique.	30
Figure II. 13: Maillage de séparateur électrostatique	31

CHAPITRE III : Résultats expérimentaux et analyse des données

Figure III. 1: Surface du champ électrique	34
Figure III. 2 : Les lignes du Champ électrique.....	34
Figure III. 3: Le potentiel électrique.....	35
Figure III. 4: Isovaleurs du potentiel électrique.	35
Figure III. 5 : La variation du potentiel électrique: (a) : négative, (b) : positive.	35
Figure III. 6: Courbe du champ électrique.....	36

Figure III. 7: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 4KV	37
Figure III. 8: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 8KV	38
Figure III. 9: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 10KV	38
Figure III. 10: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 12KV	39
Figure III. 11: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 4KV	41
Figure III. 12: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 8KV	41
Figure III. 13: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 10KV	42
Figure III. 14: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 12KV	42
Figure III. 15: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 4KV	44
Figure III. 16: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 8KV	44
Figure III. 17: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 10KV	45
Figure III. 18: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 12KV	45
Figure III. 19: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée.....	47
Figure III. 20: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée	47
Figure III. 21: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée.....	48
Figure III. 22: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée	48
Figure III. 23: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée.....	49
Figure III. 24: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée	49
Figure III. 25: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 4KV	50
Figure III. 26: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 8KV	51

Figure III. 27: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 10KV	51
Figure III. 28: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 12KV	52
Figure III. 29: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 4KV	53
Figure III. 30: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 8KV	54
Figure III. 31 : Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 10KV	54
Figure III. 32: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 12KV	55
Figure III. 33: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 4KV	57
Figure III. 34: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 8KV	57
Figure III. 35: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 10KV	58
Figure III. 36: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC,FC) à 12KV	58
Figure III. 37: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée.....	60
Figure III. 38: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée	60
Figure III. 39: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée.....	61
Figure III. 40: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée	61
Figure III. 41: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée.....	62
Figure III. 42: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée	62

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

CHAPITRE I : Généralité sur le recyclage de fibre de carbone

Tableau I. 1: Propriétés physiques et chimiques des fibres de carbone.....	8
Tableau I. 2: Répartition du marché des composites de carbone en 2018.....	9
Tableau I. 3: Proportion des différents produits de dégradation en fonction de la température de pyrolyse.	14

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, la gestion des déchets industriels et le recyclage des matériaux hauts performance constituent des défis majeurs. Parmi ces matériaux, la fibre de carbone joue un rôle essentiel dans plusieurs secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile et le sport, grâce à ses propriétés exceptionnelles : grande résistance mécanique, faible densité et stabilité thermique. Cependant, malgré ses avantages, la production de la fibre de carbone engendre d'importants déchets composites, tandis que son coût élevé, estimé entre 40 et 100 €/kg, limite son adoption à grande échelle [1].

Face à ces enjeux, la valorisation des fibres de carbone recyclées représente une solution stratégique. Le recyclage permet non seulement de réduire l'impact environnemental, mais aussi de réintégrer des fibres recyclées dans des applications industrielles à moindre coût, tout en conservant une fraction significative de leurs performances mécaniques. Ces fibres peuvent être récupérées via différentes techniques telles que la pyrolyse, la solvolysse et le broyage mécanique, chacune présentant ses propres défis en termes de pureté et de rendement [2].

Dans cette étude, nous avons choisi d'explorer un procédé innovant de séparation électrostatique, qui repose sur l'exploitation des propriétés électriques des matériaux granulaires pour optimiser le tri des fibres de carbone recyclées et du polycarbonate (PC). Ce procédé présente l'avantage d'être peu énergivore, efficace sur les matériaux fins et granulaires, et adapté aux besoins industriels en matière de recyclage.

Notre approche repose sur une étude expérimentale et numérique, intégrant des essais de séparation sous différentes configurations de tension et des simulations sous COMSOL Multiphysics pour visualiser l'interaction des particules avec le champ électrique. L'objectif de cette étude est de démontrer la faisabilité du tri électrostatique pour les fibres de carbone recyclées et d'examiner les conditions optimales permettant de maximiser leur récupération tout en garantissant leur réutilisation industrielle.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des fibres de carbone et aux différentes approches de recyclage. Il met en lumière les propriétés intrinsèques de ces matériaux, leurs procédés de fabrication à partir de précurseurs ex-PAN et ex-brai, ainsi que les méthodes de recyclage actuellement disponibles. Une attention particulière est portée aux difficultés liées à

la pureté et à la séparation des fibres, soulignant ainsi l'intérêt croissant pour la séparation électrostatique comme solution alternative.

Le deuxième chapitre est consacré à la conception et au fonctionnement du séparateur électrostatique. Ce chapitre présente le dispositif expérimental conçu pour le tri des fibres de carbone recyclées. Il aborde les principes électrostatiques, les effets du champ électrique intense, les interactions triboélectriques ainsi que les paramètres influençant la séparation des particules dans le flux d'air contrôlé.

Enfin, dans le troisième chapitre, on se penche sur l'analyse des résultats obtenus. On évalue les performances de séparation en regardant les taux de récupération et la pureté des fibres, selon les paramètres appliqués. Les résultats expérimentaux sont mis en parallèle avec la modélisation numérique effectuée sous COMSOL, ce qui permet de visualiser les distributions de champ électrique et de potentiel à l'intérieur du séparateur, tout en validant les choix techniques adoptés.

CHAPITRE I

Généralité sur le recyclage de fibre de carbone

I.1 Introduction :

Face aux enjeux environnementaux croissants et à la nécessité de développer une économie circulaire, le recyclage des matériaux composites est devenu un sujet d'intérêt majeur dans l'industrie. Parmi ces matériaux, la fibre de carbone occupe une place prépondérante en raison de ses propriétés exceptionnelles telles que sa légèreté, sa résistance mécanique élevée et sa durabilité. Utilisée dans des secteurs de pointe comme l'aéronautique, l'automobile et le sport, la fibre de carbone génère néanmoins une quantité importante de déchets en fin de vie ou lors des processus de fabrication.

Le recyclage de la fibre de carbone est donc un défi stratégique visant à réduire l'impact environnemental de ces déchets tout en préservant les performances du matériau. Plusieurs techniques ont été développées pour récupérer et réutiliser la fibre de carbone, notamment la pyrolyse, la solvolysse et le recyclage mécanique.

Ce chapitre propose une vue d'ensemble des fibres de carbone, en détaillant leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques, avant d'examiner les différentes méthodes de recyclage existantes. L'objectif est de mieux comprendre les opportunités et les défis liés à la valorisation de ces fibres afin de favoriser leur réintégration dans de nouvelles applications industrielles.

I.2 Définition :

La fibre de carbone se compose de fibres extrêmement fines, d'environ 5 à 10 micromètres de diamètre, et est composée principalement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre. L'alignement des cristaux rend la fibre extrêmement résistante pour sa taille. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour former un fil, qui peut être employé tel quel ou tissé [3].



Figure I. 1: Fibre de carbone

I.3 Fabrication de fibre de carbone :

Les premières fibres de carbone ont été obtenues à partir de fibres de rayonne chauffées entre 1000 et 1500°C sous atmosphère inerte, puis pyrolysées au-dessus de 2000°C. Le premier chauffage permettait de transformer la cellulose de la fibre végétale en carbone, le second visait à augmenter la tenue de la fibre à l'oxydation. Les fibres ainsi obtenues possédaient une résistance en traction relativement faible associée à des coûts de matière première importants. Elles ont rapidement été remplacées par des produits issus des filières utilisant d'autres précurseurs organiques : les poly acrylonitriles (PAN) et les brais de houille ou de pétrole [4].

I.3.1 Les fibres ex-PAN :

Procédure de fabrication des fibres de carbone à partir du précurseur poly acrylonitrile :

- Lors de la première étape de la fabrication du carbone, le précurseur PAN est mélangé à un solvant comme de l'acide nitrique pour être, par la suite, extrudé et filtré afin de former un fil PAN. L'étirement du polymère (Figure I.2) à la suite de l'extrusion induit une orientation préférentielle des chaînes du polymère ce qui conduira par la suite à l'anisotropie de la fibre de carbone.

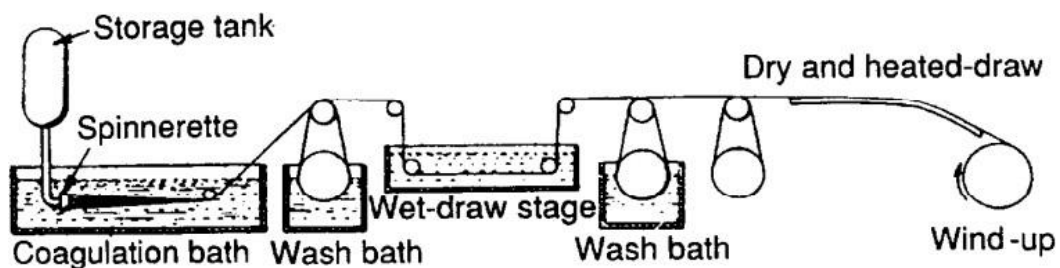


Figure I. 2: Schéma de fabrication d'une bobine de fil polyacrylonitrile

- Les fibres de PAN sont oxydées pendant une durée allant de 30 min à 3 h, à des températures comprises entre 200 et 400°C sous oxygène ou sous air.
- S'ensuit une étape de carbonisation de la fibre à des températures se situant entre 800 et 3000°C sous atmosphère inerte (azote ou argon) pour une durée de 2 à 10 minutes seulement. La température de la carbonisation influera sur la valeur du module d'Young des fibres, plus cette température est élevée, plus le module est important. Les températures se situant entre 400 et 700 °C sont ignorées, car elles ne permettent pas une modification de la structure chimique du précurseur et donc aucune augmentation de propriétés mécaniques.
- Afin d'améliorer les propriétés mécaniques de la fibre, il est possible d'effectuer une étape supplémentaire appelée graphitisation sur les fibres permettant d'augmenter le

taux de graphite de la fibre (environ 99 % après graphitisation). Cette étape consiste à exposer les fibres à une température supérieure allant de 1500 à 3000 °C pendant un temps d'une minute pour augmenter la valeur du module de la fibre. L'exposition à cette température élevée permet de modifier la structure des fibres pour transformer le carbone en graphite que l'on peut représenter par un ensemble d'empilement de feuillets.

- À la suite de ces différents traitements (Figure I.3), les réactions entre les molécules de carbone de la surface de la fibre et son environnement sont très faibles ce qui pose un problème quant à la réalisation de matériaux composites. Il va donc être nécessaire de fonctionnaliser la surface de la fibre, pour cela, il est possible d'améliorer l'accroche mécanique ou chimique en augmentant la rugosité à la suite d'un traitement acide ou bien en modifiant les composantes chimiques de surfaces de la fibre [5].

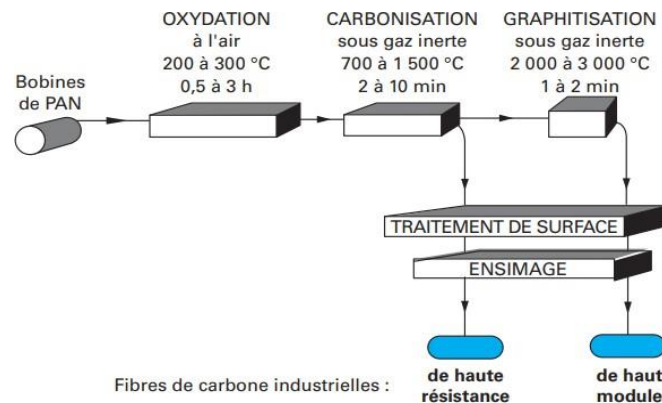


Figure I. 3: Procède de mise en forme des fibres de carbone Ex-PAN

Le schéma suivant détaille le procédé de fabrication d'une fibre de carbone ex-PAN, à partir d'une bobine de polyacrylonitrile. Les principaux effluents générés ainsi que les produits employés sont indiqués à titre indicatif.

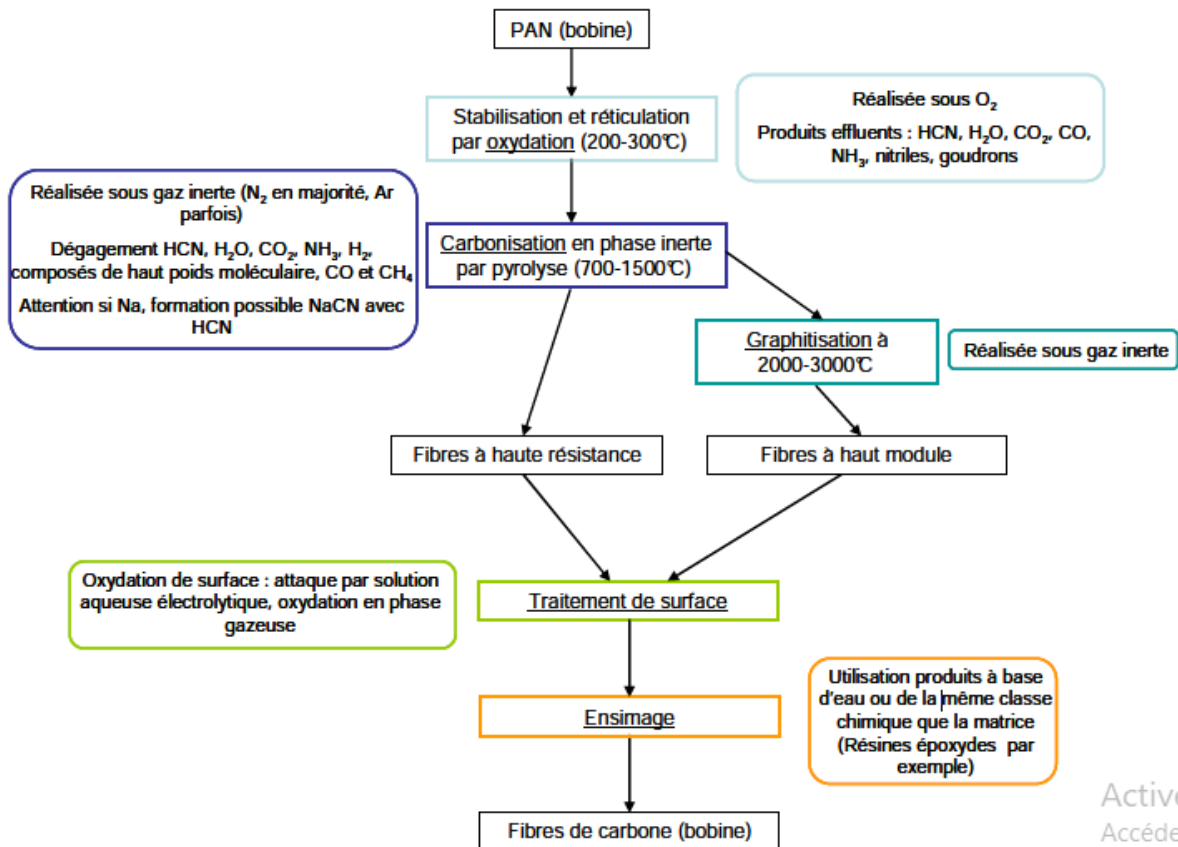


Figure I. 4: Description du procédé de fabrication d'une fibre de carbone ex-PAN

I.3.2 Les fibres ex-brai :

Le brai est un résidu du traitement du pétrole ou de la houille qui se compose d'un mélange d'hydrocarbures aromatiques. On fait subir à ce mélange un traitement thermique à 350°C sous atmosphère inerte, afin de créer des molécules poly aromatiques de taille importante appelées mésophases. C'est cette mésophase qui est par la suite filée et étirée de 300 à 500%. A ce stade et contrairement aux fibres ex-PAN, la structure carbonée est déjà formée. Le traitement d'oxydation entre 150 et 250°C n'a pour objet que de rendre la fibre infusible. Les traitements de carbonisation et de graphitisation sont ensuite similaires à ceux effectués pour les fibres ex-PAN [6].

I.4 Caractéristiques physiques des fibres :

Les fibres de carbone sont caractérisées par leur faible densité, leur résistance élevée à la traction, leur souplesse, leur bonne conductibilité électrique, leur tenue en température (à plus de 2 500 °C, dans un milieu inerte), leur faible coefficient de dilatation thermique, et leur inertie chimique (sauf à l'oxydation).

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres de carbone dépendent elles-mêmes de la nature chimique du précurseur, des conditions physiques et chimiques de fabrication des fibres du précurseur, des procédés et des conditions de traitement thermique du précurseur.

Selon les procédés de fabrication mis en œuvre, en particulier les conditions thermiques, on distingue les fibres « haut module » et les fibres « haute résistance ». Les variétés « haut module » ont un coefficient d'élasticité élevé (module de Young élevé). Les variétés « Haute résistance » sont particulièrement résistantes à la traction (tableau I.1)

Les fibres de graphite sont des fibres « haut module » dont la structure posséderait une rigidité plus élevée que celle de la fibre dite « haute résistance » mais l'interprétation des relations structure-propriétés fait encore l'objet de recherches [6]. Les diamètres nominaux des fibres de carbone ou de graphite se situent entre 5 et 8 μm , mais une proportion du produit ne dépassant pas 25 % peut être constituée de fibres d'un diamètre inférieur à 3 μm et d'une longueur inférieure à 80 μm [6].

Tableau I. 1: Propriétés physiques et chimiques des fibres de carbone

Fibre	Densité (g/cm ³)	Résistance à la traction (MPa*)	Coefficient d'élasticité (module de Young) (GPa*)
Fibres de carbone de bas module (à base de rayonne)	1,43 - 1,70	345 – 690	21 – 55
Fibres de carbone de haut module (à base de rayonne)	1,65 - 1,82	-	345 – 517
Fibres de carbone (à base de PAN)	1,70 - 1,80	2400 - 2750	193 – 241
Fibres de carbone, fil continu (à base de brai)	2	2000	345

I.5 Défis et limitations [7]:

- ✓ **Coût élevé :** La fabrication de produits en fibre de carbone est un processus complexe et coûteux, ce qui limite son utilisation à des applications où ses avantages justifient le coût.
- ✓ **Fragilité en compression :** Bien que la fibre de carbone soit très résistante en tension, elle peut être plus fragile en compression, ce qui nécessite une conception et une ingénierie spécifiques pour éviter les défaillances.

- ✓ **Sensibilité aux impacts** : La fibre de carbone peut être sensible aux impacts et aux chocs. Les structures en fibre de carbone peuvent être endommagées de manière invisible après un impact, nécessitant une inspection approfondie pour détecter d'éventuels dommages.
- ✓ **Conductivité électrique (dans certains cas)** : Bien que la conductivité électrique puisse être un avantage, elle peut également poser des problèmes dans certaines applications où une isolation électrique est nécessaire.
- ✓ **Difficulté de recyclage** : La recyclabilité de la fibre de carbone est un défi en raison de sa structure complexe. Le processus de recyclage peut être coûteux et nécessite des technologies spéciales.
- ✓ **Design et assemblage complexes** : La conception et l'assemblage de structures en fibre de carbone peuvent être plus complexes que celles en d'autres matériaux, nécessitant une expertise spécifique .

I.6 Applications des fibres de carbone :

Répartition du marché des composites de carbone, en 2018, en masse sur un total de 154 700 tonnes et en valeur sur un total de 23,15 milliards de dollars [8].

Tableau I. 2: Répartition du marché des composites de carbone en 2018

Secteur d'application	en masse	en valeur
Aéronautique, espace et défense	36 %	57 %
Automobiles	24 %	18 %
Éoliennes	13 %	8 %
Sport et loisirs	13 %	11 %
Construction	5 %	2 %
Autres	9 %	5 %

I.6.1 Aéronautique, espace et défense :

Les matériaux composites à base de fibres de carbone sont employés dans les freins (composites carbone-carbone), déflecteurs, capotages, gouvernes, dérives d'avions, pales d'hélicoptères, tuyères des propulseurs à poudre d'Ariane V...

Le premier avion commercial contenant des matériaux composites à base de fibres de carbone est le Boeing 767, mis en service en 1983, qui en renfermait 6 % de son poids.

- Le Boeing 777 mis en service en 1995 renferme 11 % de son poids en matériaux composites.
- L'Airbus A340, mis en service en 1993, a 12 % de son poids, en matériaux composites à base de fibres de carbone.
- L'Airbus A380 renferme 35 t de fibres de carbone et 23 % de son poids en matériaux composites.
- Le Boeing 787 renferme 30 t de fibres de carbone et 50 % de son poids en matériaux composites, 20 % en aluminium, 15 % en titane, 5 % en acier.

La structure de tous les avions militaires est principalement composée de matériaux composites à base de fibres de carbone [8].

I.6.2 Industries diverses :

Les fibres de carbone sont utilisées dans les plaquettes de frein, les trains TGV, les prothèses de hanche, les réservoirs haute pression, les ultracentrifugeuses pour la séparation isotopique de l'uranium.

Les composites à base de fibre de carbone sont plus transparents aux rayons X que l'aluminium et sont utilisés dans les appareillages d'analyses médicales (tables de radiographie) [6].

I.6.3 Automobile :

Les matériaux composites sont très utilisés pour la fabrication de véhicules de compétition, la Formule 1 étant au premier plan : les éléments de carrosserie, caractérisés par leur légèreté et leur aérodynamisme, sont constitués entre autres de composites de carbone. Les freins haute performance sont par ailleurs constitués de composites carbone-carbone. A noter que de tels matériaux sont également utilisés pour la pratique du « tuning » ou préparation automobile visant à modifier un véhicule de série pour des raisons de performance et/ou d'esthétique [9].

I.6.4 Génie civil :

Les fibres de carbone possèdent un ensemble de propriétés physiques ou mécaniques qui en font un matériau de renforcement de toute première qualité dans certaines applications liées au bâtiment et aux ouvrages de génie civil. Les principaux utilisateurs dans la fabrication de câbles d'amarrage de plate-forme off-shore, de haubans. Par exemple, la passerelle de Larouin (64) de 120 m de long, sans pile intermédiaire, est soutenue par 16 haubans en composite de fibres de carbone [9].

I.6.5 Sports et loisirs :

Ce secteur d'activité est pratiquement le seul où l'on emploie des composites de hautes performances (HP) pour des articles de très grande consommation (cannes à pêche, raquettes, skis...). Les fibres de carbone associées à une matrice époxyde étant plutôt utilisées pour les matériels utilisés en compétition [9].

Les clubs de golf représentent une part de 38 % des revenus pour les matériaux composites dans le domaine sportif, les raquettes de tennis, 21 %, les bicyclettes, 14 % [8].

I.6.6 Autres applications industrielles :

Les matériaux composites à base de fibres de carbone sont également retrouvés dans de nombreuses autres applications industrielles, telles que la fabrication de [9]:

- réservoirs haute pression : fabriqués par enroulement filamentaire ou tressage selon leur géométrie, leurs applications sont multiples (stockage de gaz, réservoirs de carburant, traitement des eaux, etc.)
- pales d'éolienne (carbone-époxyde ou verre-carbone-époxyde).
- biomatériaux/prothèses.
- divers équipements haut de gamme très variés (téléphone portable, ordinateur, lunettes de soleil, etc.)

I.7 Recyclage de fibre de carbone :

I.7.1 Définition du Recyclage :

C'est la transformation d'un produit pour en faire une nouvelle utilisation. Recycler permet d'avoir à nouveau de la matière première. Ainsi, on peut fabriquer de nouveaux produits ou créer de l'énergie, sans puiser dans les ressources naturelles (arbres, minerais, pétrole) [10].

I.7.2 Principe du Recyclage :

La stratégie des « Trois R » constitue le modèle de gestion des déchets et des produits en fin de vie sur lequel repose son action [10] :

- Réduire la quantité de produits qui arrivent en fin de vie.
- Réutiliser des produits ou certaines de leurs parties qui deviendraient autrement des déchets
- Recycler les matières premières

I.7.3 Technique du Recyclage :

I.7.3.1 Recyclage mécanique par broyage :

Le recyclage mécanique par broyage a été étudié pour les composites thermodurcissables renforcés de fibres de verre ou de fibres de carbone. Ce procédé consiste à broyer intégralement le composite dans un broyeur à haute vitesse. Le matériau se transforme donc en éléments plus fins allant typiquement de 4 mm de longueur à des particules micronisées de moins de 50 μ m. Une opération de tamisage finale permet de fractionner le recyclat obtenu en 3 lots selon la longueur des fibres récupérées : fibres longues, fibres courtes et poudre micronisée (Figure I.5).

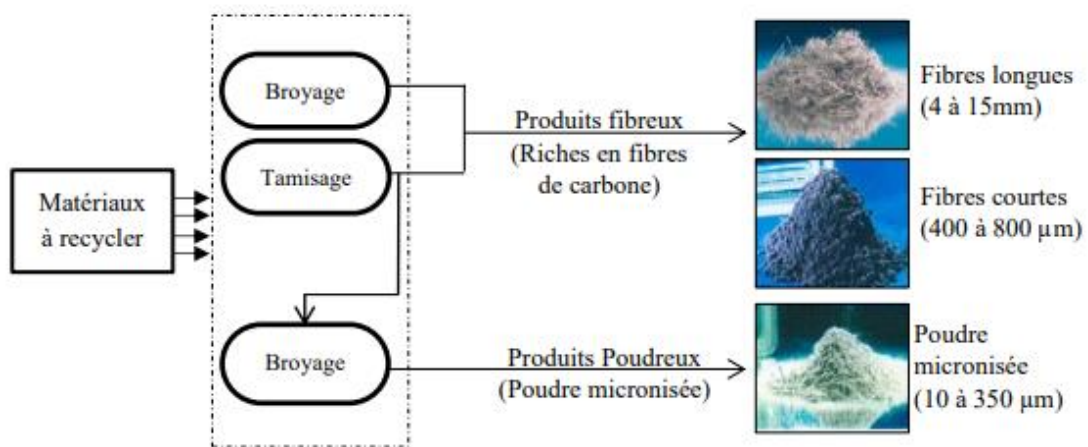


Figure I. 5: Schéma du principe du recyclage mécanique des composites par broyage

Les recyclats sont utilisés sous forme de broyats dans le bâtiment et le génie civil et sont aussi intégrés dans l'industrie automobile sous forme de charges dans des parties non structurales. Ce procédé a été généralement utilisé pour le traitement des composites renforcés de fibres de verre et appliqué à l'échelle industrielle par différentes sociétés telles que RCOM Composites Recycling en Allemagne, Phoenix Fiberglass au Canada ou MCR en France.

Dans le cas du recyclage mécanique des composites thermoplastiques, le broyage permet d'obtenir des granulés réintégrables dans les cycles d'injection/extrusion.

Cette technique reste très agressive et provoque une dégradation des fibres de carbone. Du fait de la faible longueur (inférieure à 25mm) et de la disparité d'orientation des fibres ainsi produites, il n'est pas possible d'exploiter leur résistance en tant que renfort pour de futurs matériaux composites de seconde génération. Cependant, seules les fibres plus ou moins longues (Figure I.5) peuvent être récupérées par tamisage, mais leur principal intérêt à savoir renforcer les pièces composites dans des directions privilégiées, est alors perdu. Ces dernières peuvent être utilisées en mélange avec de nouvelles matrices polymériques (des résines thermoplastiques pour l'injection ou des résines type polyester ou vinylester) pour les procédés SMC (Sheet Moulding Compound) ou BMC (Bulk Moulding Compound).

Il paraît donc évident qu'une meilleure valorisation nécessite une séparation des renforts fibreux de leur matrice. Cette valorisation se base sur des procédés chimiques et thermiques qui permettent la récupération des structures fibreuses et des fibres discontinues plus ou moins longues [11].

I.7.3.2 Recyclage thermique :

Certaines méthodologies de revalorisation des déchets comme l'incinération ou la combustion ne permettent pas une réutilisation de la matière mais seulement une valorisation énergétique des déchets. Elles ne sont donc pas, à proprement parler des techniques de recyclage.

Aujourd'hui, deux procédés thermiques sont utilisés pour le recyclage de ces composites :

Le Lit fluidisé et la pyrolyse.



Figure I. 6: Fibres de carbones recyclées par pyrolyse sur lit fluidisé

Le lit fluidisé est une technique en cours de développement qui consiste en l'utilisation d'un Réacteur sous pression (10 à 25 KPa) dans lequel du sable de silice est fluidisé à l'aide d'un Courant d'air chaud compris entre 450 et 550 °C. Les composites en fin de vie sont Préalablement découpés en fragment de 6 à 20 mm50 pour atteindre une longueur en fin de Procédé de 5 mm, un module d'Young équivalent aux fibres initiales et 75 % de la résistante à

Rupture. Le principal inconvénient de ce procédé reste l'aspect duveteux des fibres obtenues Et la nécessité de réduire drastiquement leur taille.

Le procédé thermique le plus étudié et utilisé aujourd'hui reste la pyrolyse. Il s'agit d'une décomposition thermique de la matrice thermdurcissable à une température variant entre 400 Et 800 °C en fonction du type de matrice et du gaz utilisé. Certains procédés fonctionnent Jusqu'à 1 000 °C mais au-delà de 800 °C, les fibres peuvent être endommagées ce qui entraîne Une chute des propriétés mécaniques. Dans une étude menée en 2012, Pimenta et Pino ont Étudié l'impact de différents cycles de pyrolyse sur les propriétés physiques et mécaniques de Fibres de carbone commerciales AS4. Ils ont montré que les propriétés mécaniques des fibres Résultantes étaient très dépendantes des conditions opératoires et notamment de la Température.

La décomposition de la matrice polyépoxy entraîne la formation d'espèces ayant un plus petit Poids moléculaire sous forme solide, d'huile, de cire et de gaz. Le Tableau I. 3 indique pour Différentes températures de pyrolyse, le type et la proportion de résidus. On observe que plus La température de pyrolyse augmente, et plus la part de composés gras et gazeux (CH₄, CO₂, H₂, CO) augmente. Malgré certains travaux comme ceux de permettant une Revalorisation des gaz en H₂, l'augmentation des composés volatils est problématique.

Notamment dans une optique d'industrialisation car elle demande des étapes de traitement Supplémentaires (comme le traitement thermique).

Tableau I. 4: Proportion des différents produits de dégradation en fonction de la température de pyrolyse.

Température (°C)	Résidu solide (% masse)	Huile/Cire (% masse)	Gaz (% masse)
350	81,7	18,0	0,2
400	70,7	27,6	1,7
500	67,4	31,3	1,2
600	69,6	29,4	1,0
800	65,3	31,7	3,0

D'autres méthodes, plus coûteuses en énergie, ont aussi permis de recycler des composites Polyépoxy / fibres de carbone seulement avec de la vapeur d'eau à des températures comprises entre 600 et 800 °C. Ont recyclé un composite DGEBA durci avec du diamino – diphenyle méthane entre 700 et 800 °C en 140 minutes. Cependant, la résistance à la traction des fibres récupérées n'est plus qu'à 66 % de la valeur des fibres initiales.

Plus généralement, le procédé de pyrolyse et par extension l'ensemble des procédés Thermiques ont un impact environnemental élevé lié à leur consommation énergivore et aux Rejets dans l'atmosphère. D'après l'analyse de cycle de vie (ACV) réalisée par Meng La pyrolyse rejette 2,88 kg CO₂eq/kg de déchets composites à fibres de carbone (contre 1,51kg CO₂eq/kg pour les procédés chimiques), ce qui en fait le procédé de recyclage le plus Impactant avant la prise en compte des bénéfices environnementaux du recyclage de la fibre (Crédit environnemental). Des méthodes moins énergivores et limitant les rejets volatiles ont donc été développées parallèlement à ces procédés comme le recyclage chimique [12].

I.7.3.3 Recyclage chimique :

Le recyclage chimique peut être divisé en deux groupes : la solvolysse supercritique et le Recyclage chimique par réactivité. La solvolysse supercritique utilise des solvants tels que l'eau, l'alcool (méthanol et éthanol) ou l'acétone dans des conditions supercritiques, quasi Critiques ou sous-critiques pour décomposer les matrices polyépoxy thermodurcissables. Dans certains cas, une catalyse acide ou alcaline est ajoutée pour améliorer la capacité de dégradation du système. Les conditions de dégradation dépendent du solvant utilisé.

Ont utilisé de l'eau avec H₂O₂ en présence de KOH à une Température comprise entre 250 et 400 °C et à une pression de 40 à 280 MPA pour récupérer Des fibres de carbone qui conservent entre 90 et 98 % de la résistance à la traction par rapport Aux fibres initiales. La solvolysse supercritique est difficile à mettre en œuvre à l'échelle Industrielle en raison du type spécifique de réacteurs nécessaires aux conditions Supercritiques. En outre, le procédé est coûteux et consomme beaucoup d'énergie. Aucune Ligne préindustrielle de recyclage des composites par solvolysse supercritique n'est connue Avant 2020. La société alpha recyclage composites (Toulouse) a cependant lancé une ligne Pré-pilote de 300 t/an par vapo-thermolyse (recyclage par vapeur d'eau). Pour réduire leur Impact sur l'environnement, des procédés de recyclage chimique à pression atmosphérique ont Été développés au cours des deux dernières décennies. Dans ces réactions, la matrice Thermo durcie réagit chimiquement, ce qui entraîne la rupture des liaisons covalentes et la Dépolymérisation de la matrice.

Parmi les solvants principalement utilisés, on retrouve les solvants aqueux (eau, peroxyde

D'hydrogène) ou organiques (éthanol, alcool benzylique). En plus de leur caractère polluant Ou non recyclable, certains solvants utilisés sont visés par la réglementation REACH. C'est le Cas du N, N-diméthyl formamide (DMF) ou de la N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP) qui sont utilisés dans le cadre de réactions de Trans estérification. Cette liste répertorie les substances susceptibles d'être impactées par une restriction ou une interdiction.

L'intensification des réglementations et des interdictions rend l'utilisation de certains solvants Organiques difficile voire impossible. Les procédés de recyclage chimiques industriels peinent à voir le jour en raison de la nature des produits chimiques employés, souvent toxiques et non recyclables [12].

I.8 Le défi du recyclage :

La recyclabilité est un facteur essentiel. Plus de 30 % de l'ensemble des fibres de carbone produites se transforment en déchets à un moment donné du processus de fabrication, ou en composants en fin de vie. Résoudre ce problème offrirait une opportunité environnementale et économique majeure aux industries à forte consommation d'énergie telles que l'aviation. Toutefois, l'un des principaux défis consiste à ce jour à obtenir de la fibre de carbone recyclée qui conserve les mêmes propriétés mécaniques que la fibre de carbone vierge.

La complexité technique requise pour surmonter ce problème, ainsi que la demande de l'industrie en matériaux de la plus haute qualité, ont mené les industries à rejeter l'utilisation de matériaux recyclés pour les applications haut de gamme, telles que le secteur aéronautique [13].

I.9 Conclusion :

Depuis plusieurs décennies, les fibres de carbone sont utilisées pour renforcer et alléger divers matériaux. Par conséquent, leur recyclage est devenu un enjeu majeur pour la métallurgie et les industries exploitant largement les matériaux composites. Grâce à leurs propriétés mécaniques remarquables, leur légèreté et leur résistance aux conditions extrêmes, les fibres de carbone jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons notre nouveau séparateur électrostatique développé pour le tri des fibres de carbone recyclées.

CHAPITRE II
Étude et Simulation d'un nouveau
Séparateur Électrostatique à Flux
d'Air

II.1 Introduction

La séparation électrostatique est une méthode efficace pour trier des matériaux selon leurs propriétés de charge électrique. Elle est particulièrement utilisée dans les procédés de recyclage et de valorisation des déchets, notamment pour séparer des mélanges de plastiques et de matériaux conducteurs.

Dans cette étude, nous présentons un séparateur électrostatique à flux d'air modifié pour le traitement de fibres légères. Ce dispositif a été conçu pour répondre aux défis posés par la séparation de matériaux à faible densité, comme les fibres de carbone recyclées. Il repose sur la génération d'un champ électrique dans une chambre fermée, associée à un flux d'air contrôlé assurant une fluidisation douce du mélange.

Ce chapitre est consacré à la description du système expérimental, à l'explication du principe de fonctionnement, à la procédure des essais menés avec différents matériaux, ainsi qu'à l'analyse du champ électrique à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 5.6, utilisé pour simuler la répartition du champ dans notre dispositif.

II.2 Séparateur électrostatique :

Les procédés de séparation électrostatique reposent sur l'interaction entre les particules chargées et un champ électrique. Ce principe permet de trier différents matériaux en fonction de leur comportement électrique lorsqu'ils sont exposés à un champ intense. Utilisés dans de nombreux secteurs industriels, ces dispositifs permettent de séparer des particules issues de matières premières telles que le charbon, le sable ou les cendres volantes. On les retrouve également dans le domaine du traitement des déchets, notamment pour distinguer les matériaux recyclables des non-recyclables. Les séparateurs électrostatiques existent en plusieurs configurations, avec un fonctionnement continu ou par lots. Leur efficacité dépend de plusieurs paramètres comme la taille, la densité, la forme et surtout la charge électrique des particules en présence [14].

II.3 Description :

Le séparateur électrostatique à flux d'air est un prototype expérimental développé pour la séparation d'un mélange de fibres semi-conductrices (fibres de carbone recyclées) et d'un polymère isolant (polycarbonate, PC), en exploitant les effets d'un champ électrique combiné à un flux d'air contrôlé.

Le dispositif est composé des éléments suivants :

1. **Chambre de séparation** : L'enceinte principale est une chambre parallélépipédique en plexiglas transparent, mesurant environ 52,9 cm de hauteur, 12 cm de largeur et 13 cm de profondeur. Sa paroi supérieure est trapézoïdale, ce qui facilite l'introduction du flux d'air et l'observation directe des trajectoires des particules pendant l'expérience.
2. **Électrodes latérales** : Deux électrodes en aluminium sont fixées sur les faces internes opposées de la chambre. Ces électrodes sont reliées à deux alimentations haute tension continue réglables, de polarités opposées. Le champ électrique généré dans la chambre agit sur les particules chargées, les attirant ou les repoussant en fonction de leur polarité.
3. **Entrée d'air et particules** : L'entrée située dans la partie supérieure du séparateur permet d'injecter simultanément le mélange de fibres et le flux d'air. Celui-ci joue un rôle essentiel dans la suspension et le guidage des particules à travers la chambre.
4. **Charge des particules** : La charge des particules se produit par frottement mutuel (effet triboélectrique) ainsi que par contact ou glissement contre les parois internes en plexiglas de la chambre.
5. **Structure inclinable** : Le dispositif est monté sur un support qui permet de modifier manuellement son inclinaison. L'inclinaison de la chambre permet d'ajuster la composante gravitaire du mouvement des particules, influençant ainsi leur trajectoire dans le champ électrique.
6. **Système de collecte** : Le fond de la chambre est équipé de cinq compartiments de collecte distincts. Ceux-ci permettent de récupérer les particules séparées en fonction de leur déviation dans le champ électrique. Les fibres semi-conductrices, plus sensibles au champ, sont attirées vers les électrodes, tandis que les particules isolantes (PC) suivent en général une trajectoire plus centrale, influencée principalement par le flux d'air.

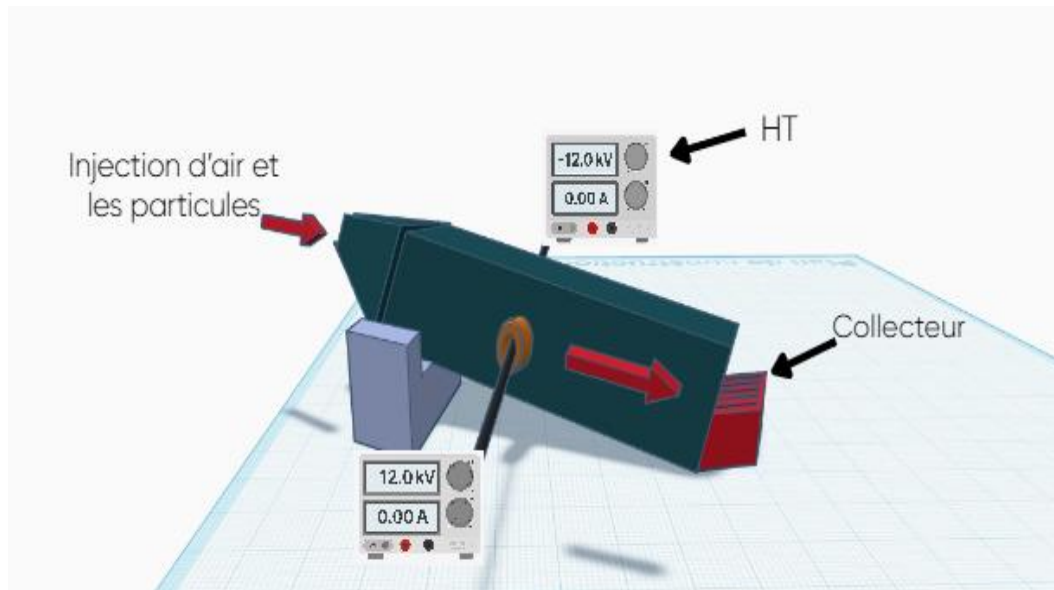


Figure II. 1: Schéma du séparateur électrostatique à flux d'air (Tinkercad)

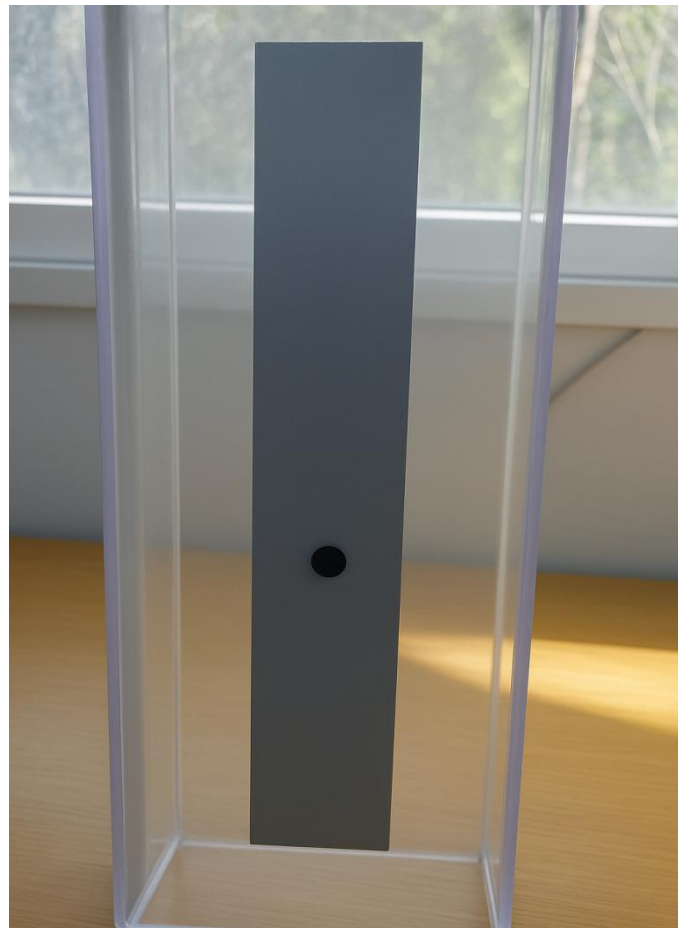


Figure II. 2: Photographie de l'électrode plane

II.4 Principe de fonctionnement :

Le séparateur électrostatique à flux d'air chargé repose sur deux étapes principales : le chargement électrostatique des granulés et leur séparation sous l'effet du champ électrique.

Le chargement du mélange granulaire est assuré par un dispositif de lit fluidisé, alimenté en air par une soufflante. Un diffuseur d'air situé à la base de la chambre assure une distribution uniforme du flux, garantissant ainsi une fluidisation homogène des granulés. Le mélange, préalablement dosé, est introduit dans l'enceinte de séparation à l'aide d'un entonnoir. En plus du brassage induit par l'air, les particules se chargent également par friction avec les parois en plexiglas de la chambre (effet triboélectrique).

Une fois dans la chambre, les granulés chargés électrostatiquement sont soumis à un champ électrique intense généré par deux électrodes en aluminium, alimentées par une source haute tension continue de polarités opposées. Sous l'effet de ce champ, les particules subissent des forces électrostatiques qui les orientent vers des trajectoires distinctes selon leur polarité :

- Les particules chargées positivement sont attirées vers l'électrode négative.
- Les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive.
- Les particules faiblement chargées suivent une trajectoire quasi-rectiligne et tombent au centre du collecteur.

La séparation est réalisée par un système de collecte composé de cinq compartiments, permettant de trier les particules selon leur degré de déviation, donc selon leur charge.

II.5 Procédure expérimentale :

Les essais ont été réalisés sur un mélange de 4 g de granulés, composé à parts égales de 2 g de fibres de carbone recyclées (semi-conductrices) et 2 g de polycarbonate (PC) (isolant). On a utilisé des fibres de carbone de longueurs de 3 mm et 10 mm. Toutes les expériences ont été réalisées à l'air ambiant (Température: 19°C, Humidité relative de l'atmosphère: 53.9%).

Après pesée, les matériaux sont mélangés manuellement, puis introduits dans le système de chargement à lit fluidisé afin d'acquérir une charge triboélectrique. Une fois chargées, les particules sont acheminées dans la chambre de séparation.

Les particules de polycarbonate, généralement chargées négativement, migrent vers l'électrode positive, tandis que les fibres de carbone recyclées, chargées positivement, sont attirées par l'électrode négative. Les particules à faible charge ou non suffisamment influencées par le champ électrique tombent dans le compartiment central.

Le champ électrique est généré entre deux électrodes planes soumises à une tension continue réglable, comprise entre 4 kV et 12 kV, selon les essais effectués.

II.6 Forces exercées sur les particules :

Dans un séparateur électrostatique à flux d'air incliné, diverses forces physiques sont appliquées simultanément aux particules solides, comme les fibres de carbone et les particules de polycarbonate. Ces forces jouent un rôle déterminant dans leur trajectoire, établissant ainsi leur séparation en fonction de leurs caractéristiques électro-physiques.

Quatre types de forces inter-particulaires interviennent dans le frottement ou, plus simplement, dans le cas du contact de deux matériaux granulaires :

- La force électrostatique
- La force gravitationnelle
- La force de frottement
- La force du flux d'air ascendant

II.6.1 La force électrostatique :

La force électrostatique (\vec{F}_e) générée par un champ électrique appliqué entre deux électrodes, agit principalement sur les particules chargées : en fonction de leur charge (positive ou négative) et de leur capacité à se charger par tribo-électrification, cette force attire ou repousse les particules vers l'électrode collectrice. Cette propriété est particulièrement utile pour différencier des matériaux ayant des comportements électrostatiques distincts. Les fibres de carbone par exemple semi-conducteurs, s'électrisent facilement et par conséquent sont fortement accentuées par le champ. Cette force est donnée par l'équation :

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E} \quad (\text{II.1})$$

Où q est la charge de la particule et \vec{E} le vecteur champ électrique.



- Lorsque les charges sont de même signe, le produit Qq' est positif et les forces d'interaction sont répulsives.



- Lorsque les charges sont de signe opposé, le produit Qq' est négatif et les forces d'interaction sont attractives.

II.6.2 La force gravitationnelle :

La gravité, qui agit naturellement vers le bas, se décompose en fonction de l'inclinaison du plan : une partie agit à la particule dans le sens de la pente et une autre la maintient parallèle à la surface inclinée. Cette gravité est proportionnelle à la masse de la particule, donc les PC sont plus gravitationnels en raison de leur poids que les fragments de fibre de carbone.

$$\vec{F}_g = m \cdot g \quad (\text{II.2})$$

Elle se décompose en deux composantes :

- **Une composante parallèle au plan incliné :**

$$F_{g, \parallel} = mg \sin(\theta) \quad (\text{II.3})$$

- **Une composante perpendiculaire au plan :**

$$F_{g, \perp} = mg \cos(\theta) \quad (\text{II.4})$$

Où :

- F_g : représente la force gravitationnelle en Newtons (N)
- m : représente la masse de la particule en kilogrammes (kg)
- g : représente l'intensité du champ gravitationnel en Newtons par kilogramme (N/kg)
- θ : angle d'inclinaison du plan

II.6.3 La force de frottement :

La force de frottement (\vec{F}_f), comme tout frottement, est la réaction que l'on obtient sur l'interface mobile d'une particule et d'un plan de référence. Il ne causera pas de tourments à la particule. Sa force s'appuie d'instruire la vectrice au poids ajoutant au modèle. Son amusement varie avec l'espérance des matériaux en contact sur la surface (texture, collante) et le poids vertical de la particule sur le plan incliné.

$$F_f = \mu \cdot F_{g, \perp} = \mu \cdot mg \cos(\theta) \quad (\text{II.5})$$

Où :

- F_f : représente la force de frottement (N)
- μ : représente le coefficient de frottement (aucune unité)

II.6.4 La force du flux d'air ascendant :

Le flux d'air ascendant a pour grands jets d'air supérieurs et exerce nervure en tant qu'élément dynamique propre pour le mouvement vers le haut de la gravité (F_a). Cette magnitude est principalement collection électoral de faible densité comme les fibres de carbone, plus au contraire leurs formes, la surface et la vitesse du courant lui-même.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (\text{II.6})$$

Où :

- ρ : est la masse volumique de l'air
- C_d : coefficient de traînée (dépend de la forme de la particule)
- A : surface projetée de la particule (en m^2)
- v : vitesse relative entre l'air et la particule (en m/s)

II.7 Instrumentation et Méthodes de Mesure :

II.7.1 Mesure de la température et de l'humidité relative :

Avant de réaliser des expériences de chargement électrostatique (effet triboélectrique) et de séparation électrostatique, il est essentiel de mesurer la température et l'humidité relative, étant donné que les résultats de ces processus sont affectés par les conditions ambiantes. On a utilisé un thermo-hygromètre numérique modèle testo 625.



Figure II. 3: Thermo-hygromètre numérique modèle testo 625

II.7.2 Mesure de la charge triboélectrique :

La cage de Faraday (figure II.5) est un dispositif fascinant qui sert à mesurer la charge électrique totale d'un objet, tout en bloquant les interférences électriques et électromagnétiques de l'extérieur. Ce système est composé de deux enceintes conductrices concentriques, séparées par un matériau isolant. L'enceinte extérieure est mise à la terre pour minimiser les perturbations externes et évacuer les charges électriques indésirables. En revanche, l'enceinte intérieure, où l'objet est placé, est isolée de la terre et reliée à un électromètre numérique (Keithley, modèle 6514) (figure II.4) qui permet de mesurer avec précision la charge électrique.

Ses avantages principaux sont suivants :

- Mesures de charge allant de 10 fC à 20 μC ;
- Vitesse élevée - jusqu'à 1200 lectures par seconde;
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants ;
- Annule aisément les décalages de tension et de courant



Figure II. 4: Electromètre numérique Keithley modèle 6514



Figure II. 5: Cage de Faraday

II.7.3 Mesure de la masse granulaire :

Il est essentiel de mesurer la masse granulaire de chaque échantillon pour obtenir des résultats expérimentaux qui soient comparables. La figure II.6 montre la balance électronique que nous utilisons pour peser les échantillons. Spécifiée par :

- Capacité de 120 à 610g
- Sensibilité 0,0001 g
- Affichage LCD avec rétro-éclairage
- 3 pare-vent en verre
- Taille du plateau Ø 80 mm



Figure II. 6: Balance analytique électronique automatique

II.7.4 Souffleur électrique :

Un souffleur est une machine que l'on peut transporter facilement, capable de produire un fort courant d'air pour souffler la poussière, le tout étant canalisé par un tuyau. Tension 230V/50Hz, puissance 600W, Flux $3\text{m}^2/\text{min}$, Vitesse a vide 0-16000 tr/min .



Figure II. 7: Un Souffleur électrique

II.7.5 Source Haute Tension :

Les électrodes de notre dispositif ont été alimentées en haute tension continue dans le but de créer un champ électrique intense entre elles. Le champ doit être assez intense afin d'être efficace ; l'application d'une haute tension est donc une condition essentielle. La source de haute tension utilisée est réglable et offre une plage de réglage de 0 à ± 50 kV qui permet de piloter avec précision le champ appliqué en conditions expérimentales.



Figure II. 8 : Alimentation haute tension continue (polarité positive ou négative)

II.8 Les matériaux utilisés :

II.8.1 Le Polycarbonate (PC) :

Le polycarbonate est un type de plastique qui se distingue par sa surface lisse, sa résistance impressionnante aux chocs, et sa rigidité qui reste stable sur une large gamme de températures. Il possède également d'excellentes propriétés électriques et diélectriques. On retrouve souvent le polycarbonate dans la fabrication de divers composants extérieurs pour les automobiles, ainsi que dans les secteurs de l'électromécanique et de l'électroménager. En ce qui concerne les DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques), le polycarbonate peut se présenter soit sous sa forme pure, soit en mélanges (comme l'ABS/PC). Voici quelques chiffres intéressants [15] :

- 13% du polycarbonate provenant des déchets plastiques vient des DEEE ;
- 3% des plastiques contenus dans les DEEE sont du polycarbonate ;
- 38% du tonnage de polycarbonate dans les DEEE provient de produits de télécommunication.



Figure II. 9: Aspect des granules de Polycarbonate (PC)

II.8.2 Fibre de carbone recyclée :

La fibre de carbone est un matériau fascinant, constitué de fines mèches de carbone qui se distinguent par leur incroyable résistance et légèreté. Ces fibres, dont les longueurs peuvent varier notamment entre 3 mm et 10 mm selon les applications sont souvent associées à du plastique pour former un composite, utilisé dans la fabrication de divers produits, tels que les avions, les éoliennes et les voitures de Formule 1 [16]. Les fibres de carbone se distinguent par leur légèreté, leur incroyable résistance à la traction, leur flexibilité, leur excellente conductivité électrique, ainsi que leur capacité à supporter des températures élevées (jusqu'à

plus de 2 500 °C dans un environnement inerte). De plus, elles possèdent un faible coefficient de dilatation thermique et une grande inertie chimique [17].

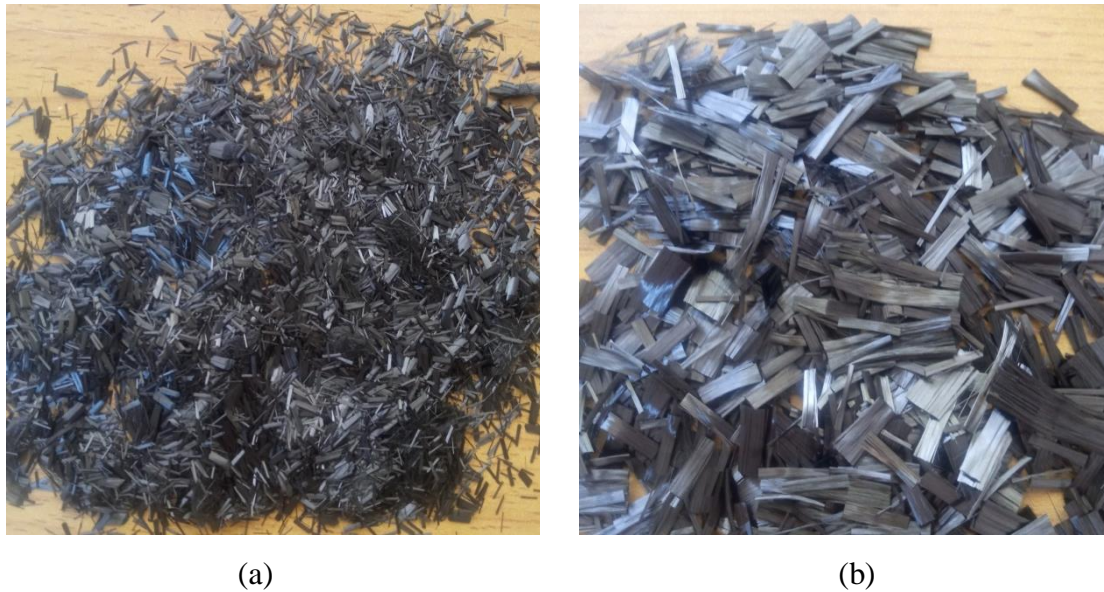


Figure II. 10: Fibre de carbone recyclée : (a) fibre de taille 3mm, (b) fibre de taille 10mm

II.9 Étude de champs électrique :

Un séparateur électrostatique à flux d'air fonctionne sur des principes physiques bien établis, surtout en ce qui concerne l'interaction entre un champ électrique et des particules chargées électrostatiquement. Son fonctionnement est régi par des règles précises, souvent exprimées sous forme d'équations algébriques, différentielles ou intégrales, qui décrivent comment les matériaux se séparent.

La création du champ électrique est assurée par un système d'électrodes hautes tension, placées sur les parois internes de la chambre de séparation. Ce champ modifie la trajectoire des particules qui entrent dans le dispositif, permettant une séparation efficace des matériaux selon leur charge. Comprendre la répartition du champ électrique dans le séparateur est crucial pour évaluer comment les différents paramètres de fonctionnement influencent l'efficacité du tri.

On peut modéliser la distribution du champ et des forces électrostatiques en utilisant diverses techniques numériques. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve les éléments finis, les différences finies et les méthodes des caractéristiques (MOC). La simulation numérique aide à visualiser la répartition du champ électrique et à optimiser la conception du séparateur pour améliorer la séparation des fibres de carbone recyclées.

Le logiciel COMSOL Multiphysics 5.6 est utilisé pour calculer le champ électrique dans la chambre de séparation. Grâce à la discrétisation par éléments finis, il est possible de

modéliser avec précision la répartition du potentiel et les lignes de champ, ce qui permet d'ajuster les paramètres du dispositif pour une efficacité maximale.

La création du modèle physique repose sur une discrétisation fine, représentée par un maillage structuré. Ce maillage est généré automatiquement et peut être affiné, que ce soit globalement ou localement, selon les besoins. Le logiciel permet différentes configurations de maillage.



Figure II. 11: Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

II.9.1 Modèle développé :

Notre modèle se compose d'une chambre parallélépipédique en plexiglas (hauteur =52.9 cm , largeur = 12cm , profondeur =13cm) et Les parois latérales ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. La simulation affichée est en régime permanent, affichant une décharge positive de 12 kV et une décharge négative de -12 kV.

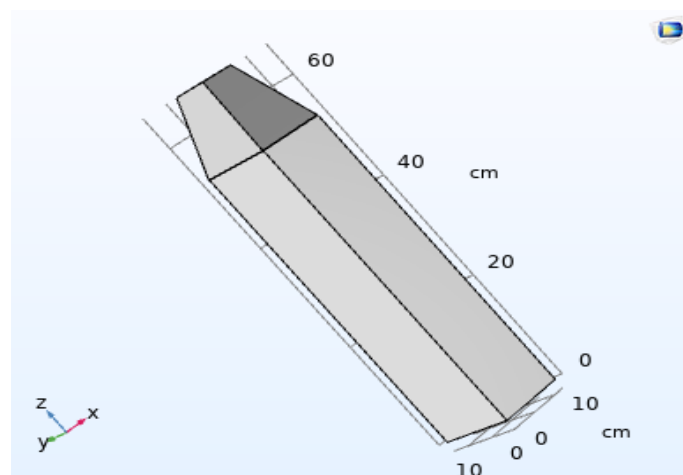


Figure II. 12: Représentation 3D de séparateur électrostatique

II.9.2 Maillage :

La mise en place du maillage dans COMSOL Multiphysics représente une étape indispensable dans la modélisation par éléments finis qui a pour but de discrétiser la géométrie du domaine à l'étude en un ensemble d'éléments simples (triangles, quadrilatères, tétraèdres), sur lesquels les équations physiques sont résolues numériquement. La qualité, la taille et la distribution du maillage ont une influence directe sur la précision et la stabilité des résultats.

Pour cela, COMSOL fournit une fonctionnalité de maillage libre ou structuré automatisé, mais aide également à affiner localement le maillage aux endroits de forts gradients de champs, tels que les bords d'électrodes, ou les interfaces de matériaux.

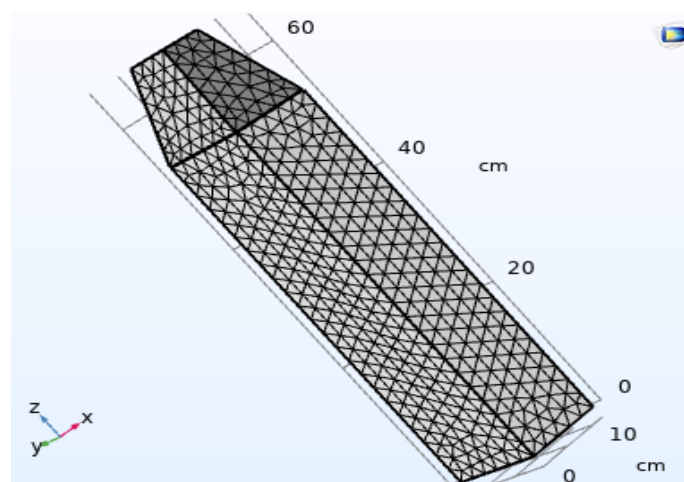


Figure II. 13: Maillage de séparateur électrostatique

II.10 Conclusion :

Dans cette étude, nous avons développé et analysé un séparateur électrostatique à flux d'air, conçu pour la séparation de matériaux légers, en particulier les fibres de carbone recyclées et le polycarbonate. Ce dispositif exploite une combinaison d'un champ électrique intense, d'un flux d'air descendant et d'une structure inclinable permettant d'ajuster la trajectoire des particules selon leurs propriétés électriques, physiques et mécaniques. Nous avons présenté une explication précise des composantes du système, des mécanismes de fonctionnement ainsi que des forces appliquées durant la procédure de séparation.

Pour conclure, ce chapitre a permis de présenter des divers équipements utilisés ainsi que l'application du champ électrique, modélisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics (version 5.6). Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus.

CHAPITRE III

***Résultats expérimentaux et
analyse des données***

III.1 Introduction :

La technique de séparation électrostatique repose sur la capacité des particules à acquérir et à conserver une charge électrique lorsqu'elles sont soumises à un champ puissant. Quand une haute tension est appliquée, les interactions électrostatiques modifient la répartition des matériaux, permettant une dissociation claire en fonction de leurs caractéristiques de charge. La configuration du champ et la polarité de la tension jouent un rôle crucial dans ces phénomènes, entraînant une réorganisation progressive des particules. Dans ce chapitre, nous allons explorer comment la haute tension, qu'elle soit positive ou négative, affecte la séparation du polycarbonate et de la fibre de carbone. Nous examinerons les taux de récupération et la pureté des matériaux dans différentes configurations, en nous basant sur des résultats expérimentaux et des simulations numériques réalisées avec COMSOL pour visualiser les distributions de potentiel et de champ électrique.

III.2 Techniques de mesure :

L'évaluation de l'efficacité de l'installation de séparation fait l'objet de l'étude expérimentale. Les grandeurs d'évaluation du procédé électrostatique sont le taux de récupération et la pureté des deux produits récupérés.

III.2.1 Taux de récupération de produit :

La performance de l'opération de séparation est appréciée à l'issue du pesage des quantités des produits recueillis dans chaque compartiment afin de déterminer les taux de récupération de chaque matériau qui caractérisent l'efficacité du processus et permettent d'évaluer en pourcentage le produit récupéré par rapport au produit total entré. Le taux de récupération des produits séparés est calculé selon la formule suivante:

$$\text{Rec (\%)} = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

m_{ic} : La quantité du produit i considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

m_{it} : La quantité totale du même produit i introduit dans le séparateur.

III.2.2 Taux de pureté de produit :

L'efficacité du processus évalue également un autre critère : le taux de pureté. Ce paramètre permet d'obtenir le taux de pureté (en % du produit) de la quantité recueillie, il se calcule comme suit :

$$\text{Pur (\%)} = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

m_{ic} : La quantité du produit i considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

m_{tc} : La quantité totale (des deux produits) collectée dans la même partie du collecteur.

III.3 Résultats et discussion de l'étude de champs :

III.3.1 Résultats de simulation obtenus :

Les figures Figure III.1, Figure III.2, Figure III.3, Figure III.4, Représentant les surfaces équipotentielles, les lignes du champ électrique lors de l'application de la haute tension 12KV à l'électrode de séparateur électrostatique.

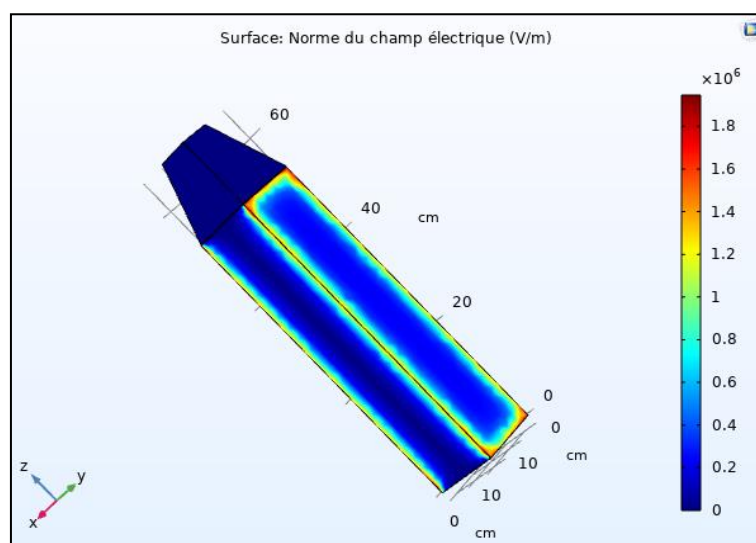


Figure III. 1: Surface du champ électrique

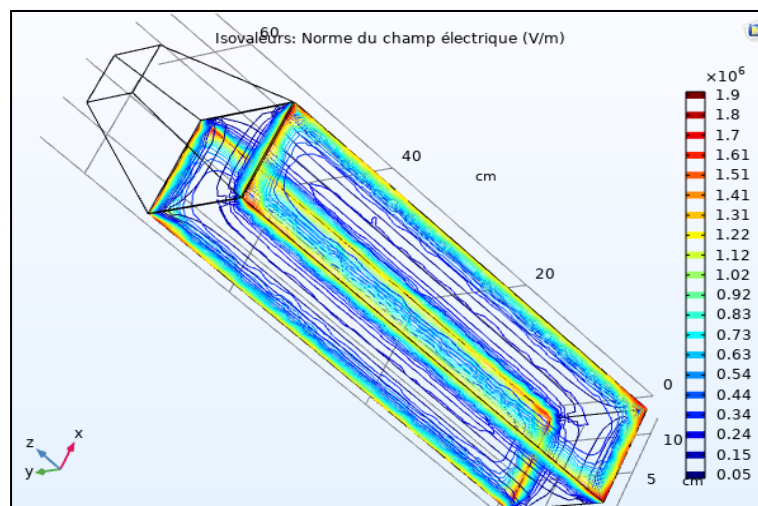


Figure III. 2 : Les lignes du Champ électrique

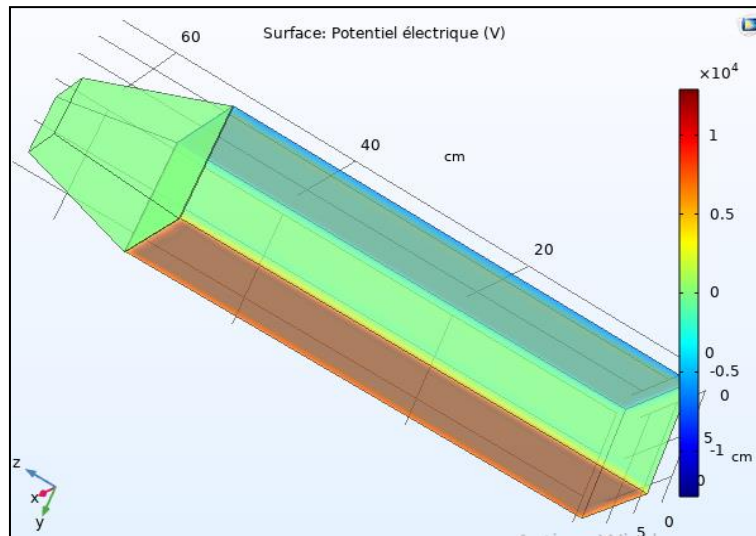


Figure III. 3: Le potentiel électrique

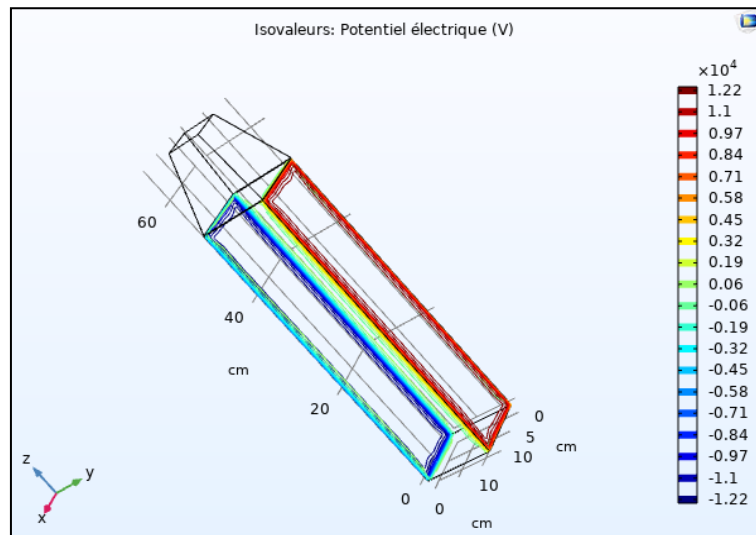
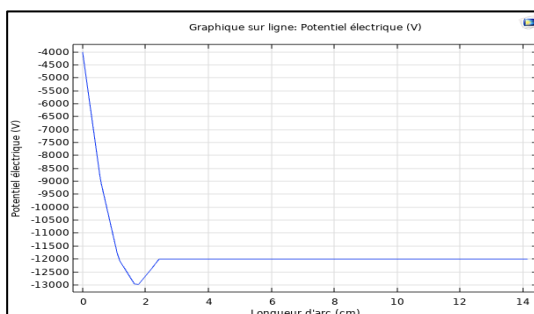
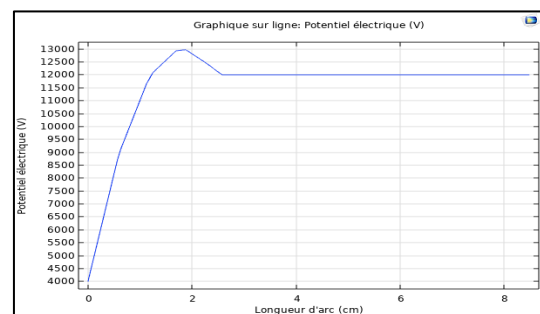


Figure III. 4: Isovaleurs du potentiel électrique

Les figures Figure III.5, Figure III.6, représentent les courbes du potentiel électrique et le champ électrique.



(a)



(b)

Figure III. 5 : La variation du potentiel électrique: (a) : négative, (b) : positive

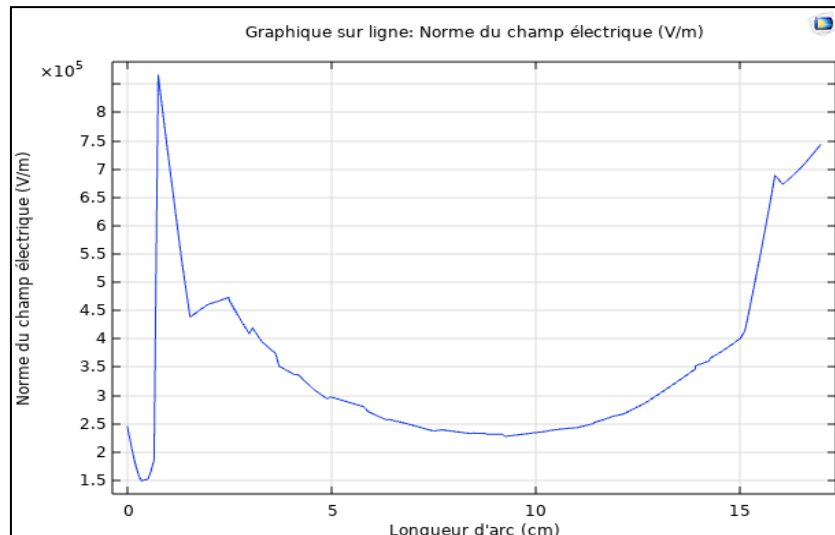


Figure III. 6: Courbe du champ électrique

III.3.2 Interprétation des résultats :

- D'après les données, on constate une organisation performante du champ électrique entre les électrodes du séparateur, ce qui assure une action optimale sur les particules.
- Quand on applique une tension de 12 kV, cela crée une différence de potentiel notable, générant ainsi un champ électrique de forte puissance. Cette configuration aide à séparer efficacement les particules en fonction de leur charge électrique.
- L'agencement des lignes de champ révèle une directionnalité bien gérée, ce qui est crucial pour un guidage précis des particules et pour améliorer leur trajectoire vers les zones de récupération.
- Les zones où le champ électrique est le plus fort indiquent les endroits où la séparation sera la plus performante, influençant directement la répartition des particules et leur réaction aux forces électrostatiques.

III.4 Résultats et Discussion du dispositif de séparateur électrostatique :

Les essais ont été réalisés sur des mélanges granulaires constitués à parts égales (50 % – 50 %) de fibres de carbone recyclées (de 3 mm et 10 mm) et de polycarbonate (PC). Cette approche expérimentale a permis d'examiner en détail comment ces deux matériaux réagissent différemment à l'intensification du champ électrique. Les résultats, obtenus à partir de diverses configurations de polarité et de tension.

III.4.1 Fibre de carbone de taille 3mm :

III.4.1.1 Influence de la haute tension positive / négative :

Pour évaluer comment la haute tension positive et négative influence la séparation des mélanges (PC et FC de taille 3m), des essais ont été effectués en appliquant des tensions de 4 kV, 8 kV, 10 kV et 12 kV aux électrodes latérales. Le mélange est brièvement exposé au champ électrique, puis il est dirigé par le flux d'air à travers la chambre inclinée. Les figures III.7 à III.10 illustrent la répartition des masses dans chaque compartiment en fonction de la tension appliquée, mettant en évidence l'évolution du comportement des particules avec l'intensification du champ électrique.

➤ U= 4KV :

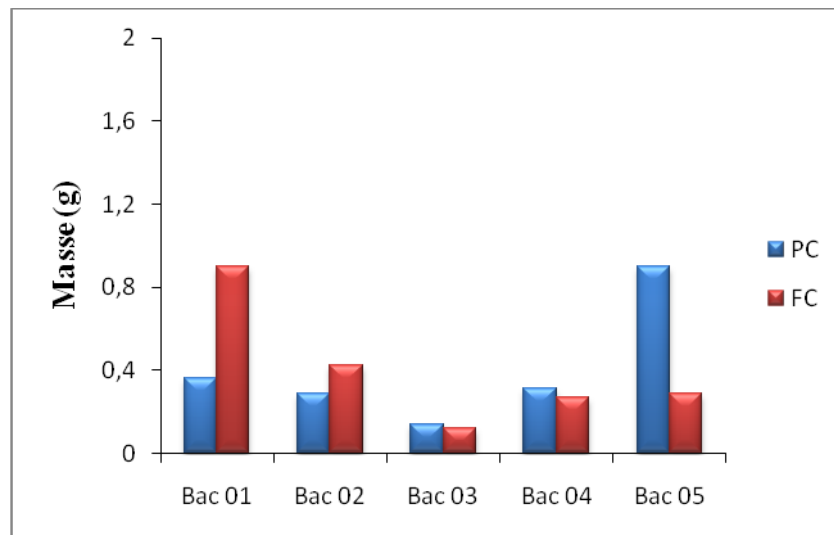


Figure III. 7: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 4KV

➤ U=8 KV :

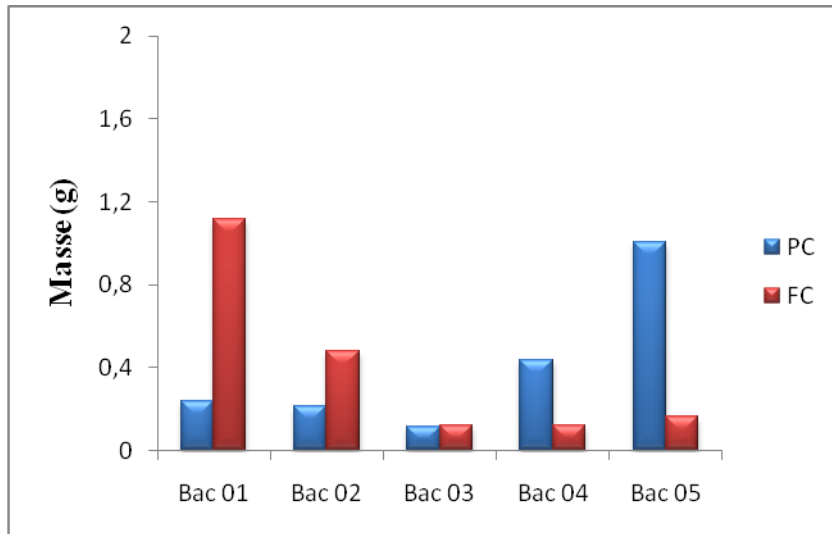


Figure III. 8: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 8KV

➤ U= 10KV :

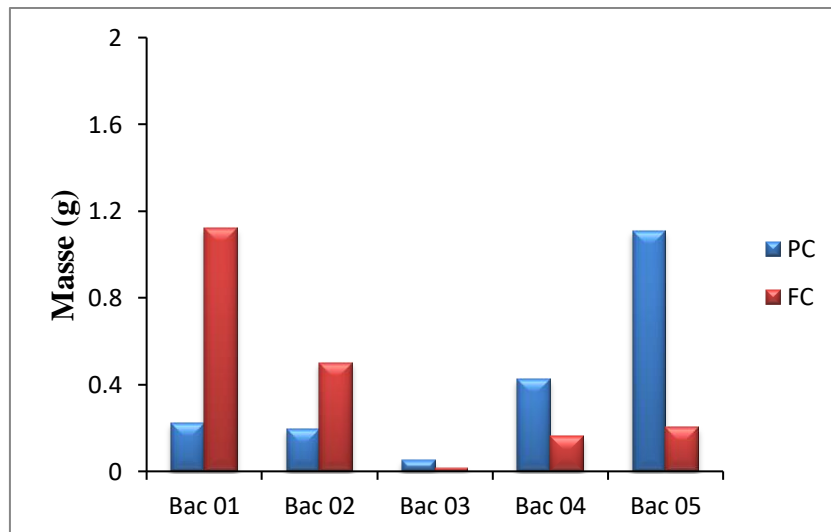


Figure III. 9: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 10KV

➤ U =12KV :

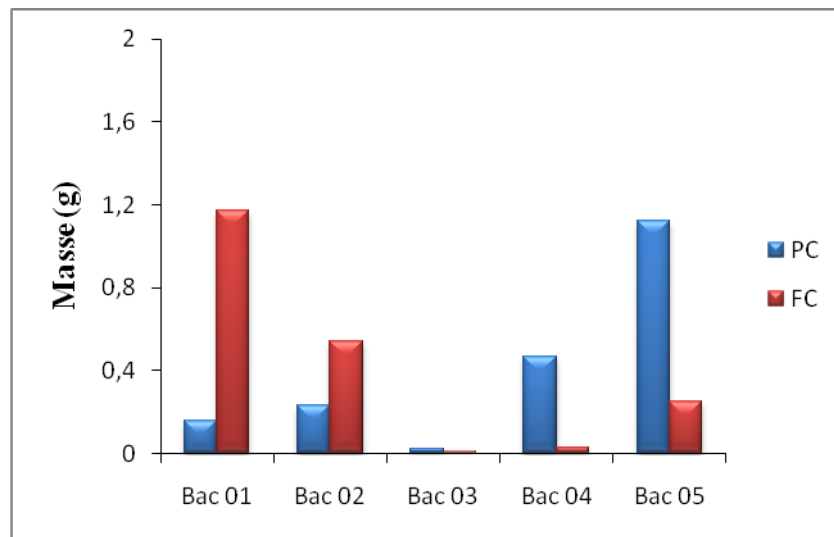


Figure III. 10: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 12KV

a) Interprétation des résultats :

- Deux électrodes sont alimentées avec des tensions opposées (ex. +12 kV et -12 kV), générant un champ électrique intense dans la chambre de séparation. Ce champ exerce une force électrostatique sur les particules, influençant directement leur trajectoire en fonction de leur charge.
- Les fibres de carbone (FC), chargées positivement, sont attirées par l'électrode négative sous l'effet de la force électrostatique, qui oriente leur trajectoire selon leur polarité.
- Le polycarbonate (PC), chargé négativement, migre vers l'électrode positive sous l'effet du même principe électrostatique. La force électrostatique exerce une attraction sur ces particules, qui se déplacent selon le champ généré entre les électrodes.
- À 4 kV, les masses des fibres de carbone (FC) se répartissent entre 0,9001 g et 0,2855 g selon les compartiments. À cette tension modérée, la force gravitationnelle devient plus prononcée, entraînant les particules vers le bas et modifiant leur répartition dans les bacs.
- À 12 kV, ces masses se concentrent davantage dans les compartiments proches de l'électrode négative (ex. bac 1), atteignant 1,1714 g, signe d'une attraction plus forte due à l'intensification du champ. Cette intensification accentue la force électrostatique, favorisant un tri plus marqué.

- Le PC suit une dynamique opposée : sa masse dans le bac 5 passe de 0,8997 g à 1,1202 g, montrant une migration nette vers l'électrode positive. En même temps que le champ électrique, la force de frottement agit sur les particules, modifiant leur vitesse et leur trajectoire avant qu'elles ne se déposent définitivement.
- L'augmentation de la tension renforce la séparation : FC vers les premiers bacs (négatifs) et le PC vers les derniers bacs (positifs), tandis que les bacs intermédiaires se vident progressivement. La force du flux d'air qui monte peut influencer les particules les plus légères, en perturbant légèrement leur trajectoire et en favorisant leur dispersion avant qu'elles ne se déposent.
- Cette polarisation croissante indique une efficacité de séparation accrue à haute tension. À 12 kV, la force électrostatique devient dominante, réduisant l'impact des autres forces sur la trajectoire des particules et améliorant la distinction entre les matériaux.
- À 12 kV, on observe des masses maximales distinctes :
 - ✓ Fibre : 1,1714 g dans le bac 1
 - ✓ PC : 1,1202 g dans le bac 5
- Les bacs centraux montrent une répartition déséquilibrée, preuve que les particules fortement chargées sont davantage déviées vers leurs électrodes respectives. Cela confirme le rôle sélectif du champ électrique, qui trie les particules selon leur charge et leur nature.
- Enfin, les fibres de carbone réagissent plus fortement que le PC, ce qui s'explique par :
 - ✓ Leur meilleure conductivité
 - ✓ Leur capacité à se charger plus efficacement

III.4.1.2 Influence de la haute tension négative/mise à la terre :

Nous testons à présent l'effet de la haute tension négative (de -4 à -12 kV) afin d'évaluer son impact sur la distribution des particules. Le champ électrique inversé, combiné au flux d'air, permet une séparation mieux contrôlée, comme le montrent les figures III.11 à III.14.

➤ U =4 KV :

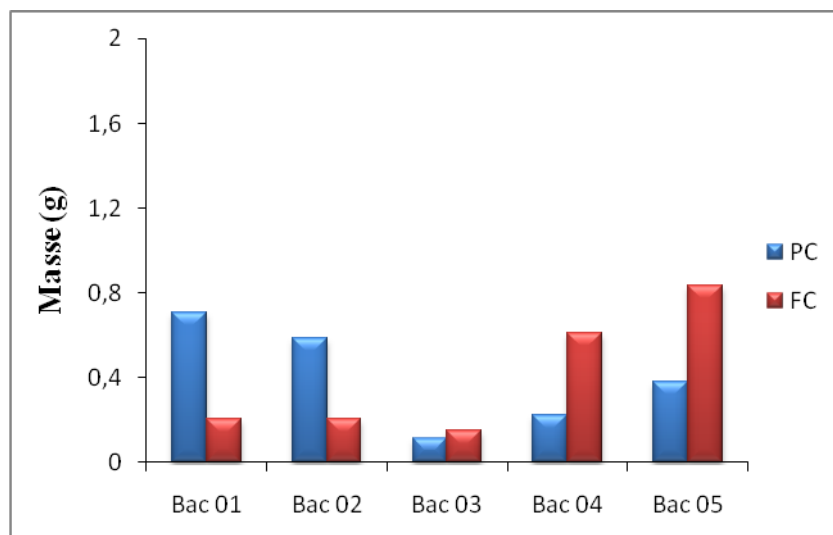


Figure III. 11: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 4KV

➤ U =8 KV :

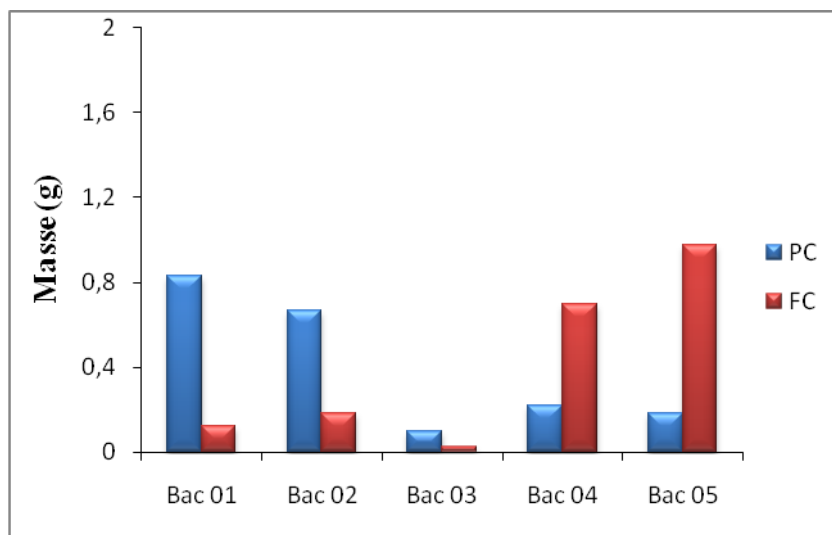


Figure III. 12: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 8KV

➤ U = 10KV :

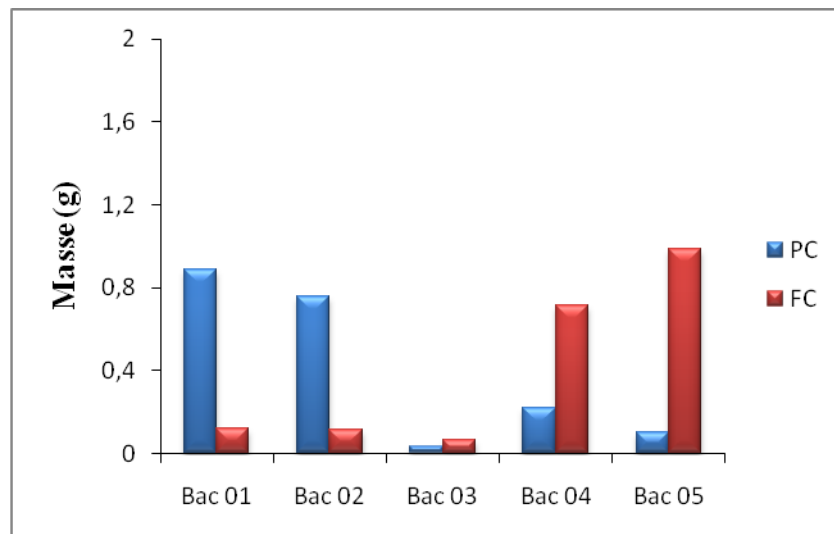


Figure III. 13: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 10KV

➤ U = 12KV :

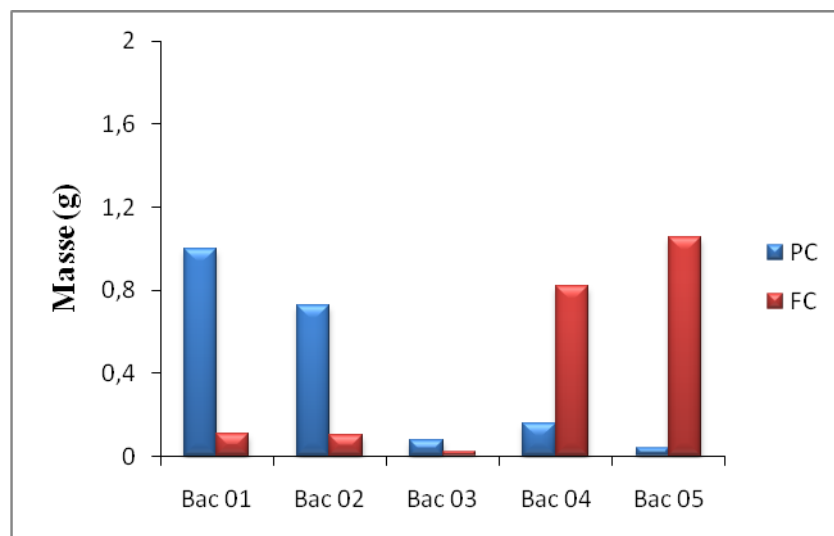


Figure III. 14: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 12KV

a) Interprétation des résultats :

- Les résultats des expériences révèlent que la masse de la fibre et du PC change avec l'augmentation de la tension appliquée, ce qui influence leur répartition dans les bacs. Ce changement est principalement dû à la force électrostatique, qui se renforce avec l'augmentation de la tension. Cela entraîne une attraction plus forte sur les particules, ce qui altère leur répartition.
- À une tension faible de 4 kV, on constate que la masse des particules est bien équilibrée, avec une présence marquée dans les bacs intermédiaires 2, 3 et 4. Cela

indique que la séparation n'est pas encore optimale. À cette tension modérée, la force électrostatique n'est pas très forte, ce qui permet à la force gravitationnelle de devenir plus influente dans la manière dont les particules se distribuent naturellement dans les bacs intermédiaires.

- En augmentant la tension, on remarque que la fibre de carbone se regroupe davantage dans le bac 5, passant de 0,8353 g à 1,0542 g entre 4 kV et 12 kV. Cela montre que l'attraction électrostatique devient plus forte avec une tension négative élevée.
- À l'inverse, le PC a tendance à migrer vers le bac 1, où la mise à la terre favorise son accumulation progressive. Sa masse augmente de 0,7042 g à 0,9999 g entre 4 kV et 12 kV, confirmant une réorganisation sous un champ prolongé. La force électrostatique tire le PC vers l'électrode positive, ce qui favorise son accumulation dans le bac 1. De son côté, la force gravitationnelle contribue à stabiliser leur dépôt progressif.
- À 8 kV et 10 kV, la séparation électrostatique devient plus évidente, avec une masse réduite dans les bacs intermédiaires et une concentration plus marquée dans les bacs de polarité opposée.
- À 12 kV, la séparation atteint son efficacité maximale : la fibre de carbone se regroupe principalement dans le bac 5 (1,0542 g), validant ainsi l'effet de la tension négative. Le PC est repoussé vers le bac 1 (0,9999 g), montrant une stabilisation sous mise à la terre. La force électrostatique fonctionne à son intensité maximale, garantissant que les particules se déplacent vers les bacs qui leur conviennent. Même si le flux d'air ascendant est faible, il peut tout de même perturber un peu la trajectoire des particules les plus légères avant qu'elles ne se posent.
- Ces résultats confirment que la polarité de la tension a un impact direct sur la répartition des masses. L'augmentation de la tension entraîne une ségrégation plus prononcée des particules, ce qui valide le principe de séparation électrostatique sous haute tension.

III.4.1.3 Influence de la haute tension positive /mise à la terre :

Dans cette analyse, nous étudions l'effet d'une haute tension positive sur la séparation des particules, en ajustant la tension de 4 à 12 kV.

➤ U= 4KV :

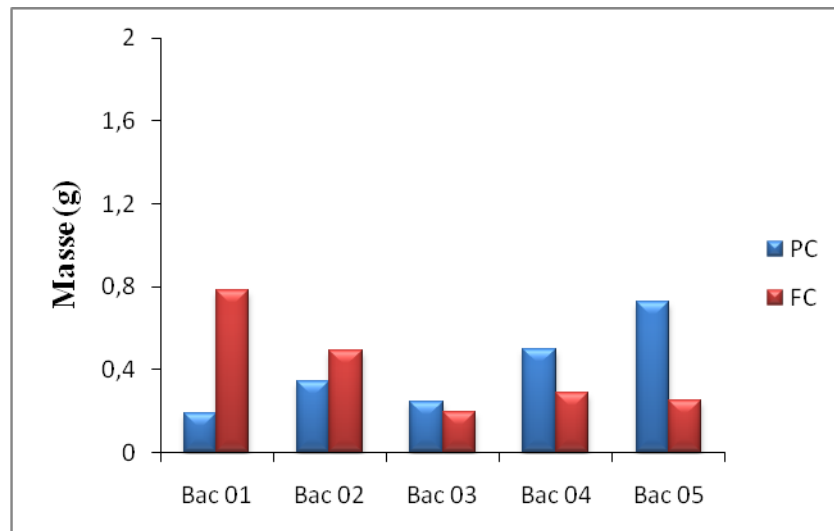


Figure III. 15: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 4KV

➤ U =8KV :

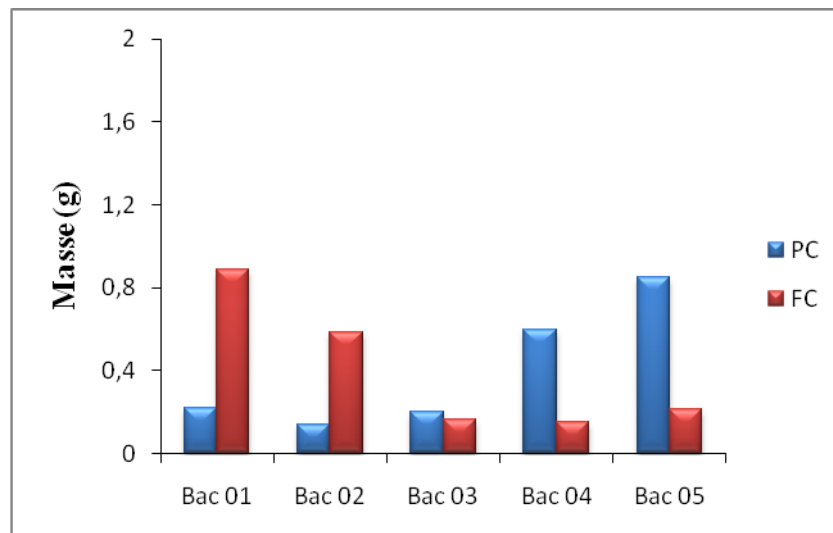


Figure III. 16: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 8KV

➤ U =10KV :

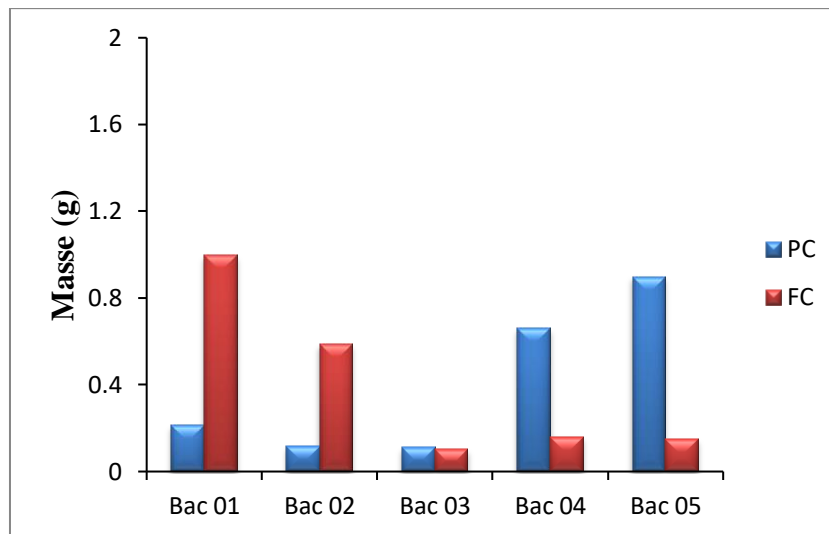


Figure III. 17: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 10KV

➤ U =12KV :

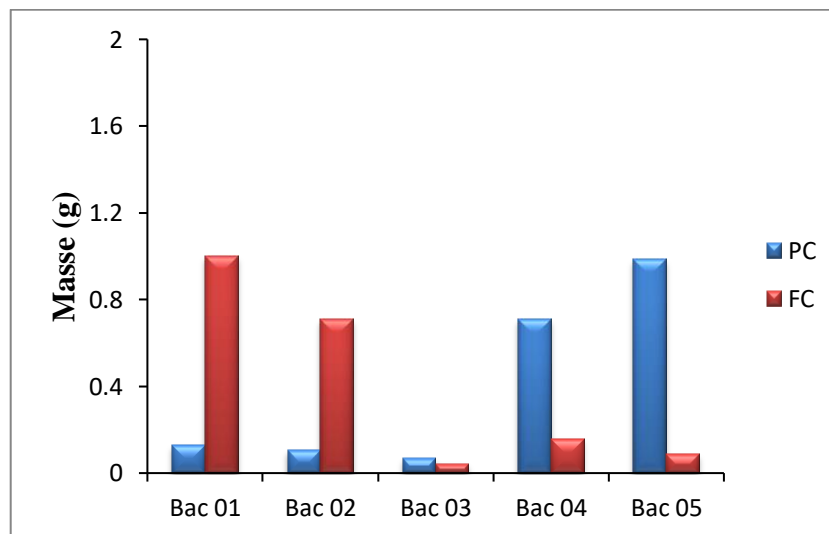


Figure III. 18: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 12KV

a) Interprétation des résultats :

➤ À 4 kV, on observe que la répartition des particules est plutôt uniforme. La masse du PC se répartit entre les différents bacs, avec une tendance à augmenter vers le bac 5, où elle atteint 0,7261 g. En revanche, la fibre de carbone se regroupe davantage autour du bac 1 (0,7793 g), ce qui confirme son attraction vers la mise à la terre. À ce niveau de tension modéré, la force électrostatique agit de manière subtile, favorisant une

dispersion plus équilibrée des particules. Parallèlement, la force gravitationnelle est essentielle pour stabiliser leur dépôt, influençant la façon dont elles se répartissent.

- Lorsque la tension augmente, la masse du PC dans le bac 5 se renforce, passant de 0,7261 g à 0,9876 g entre 4 kV et 12 kV. Cela montre une intensification de l'attraction électrostatique vers la tension positive.
- En revanche, la fibre de carbone montre une dispersion plus marquée, avec une masse qui varie dans les bacs intermédiaires, mais qui reste principalement concentrée autour des bacs 1 et 2. Cela suggère qu'elle se stabilise sous l'influence de la mise à la terre.
- À 8 kV et 10 kV, la répartition du PC devient plus précise, avec une masse plus importante dans le bac 5 (0,8998 g à 10 kV), tandis que sa présence diminue progressivement dans les bacs intermédiaires.
- À 12 kV, la séparation électrostatique atteint son efficacité maximale : le PC enregistre sa masse la plus élevée dans le bac 5 (0,9876 g), renforçant ainsi l'effet d'attraction sous haute tension positive. La fibre de carbone, quant à elle, conserve une répartition relativement stable dans les bacs 1 et 2, avec une légère présence dans le bac 5 (0,0888g), ce qui révèle une interaction électrostatique partielle sous tension positive.
- Ces résultats montrent clairement que la polarité de la tension joue un rôle essentiel dans la répartition des masses, favorisant l'accumulation du PC dans le bac 5 tout en stabilisant la fibre près de la mise à la terre.

III.4.1.4 Influence de la tension appliquée sur le taux de récupération et le taux de pureté :

Les figures III.19 à III.24 présentent les résultats des expériences, en termes de taux de récupération et de pureté de mélange PC et FC de taille 3mm, en fonction de la tension continue appliquée entre les électrodes du séparateur électrostatique.

✚ La tension positive / négative :

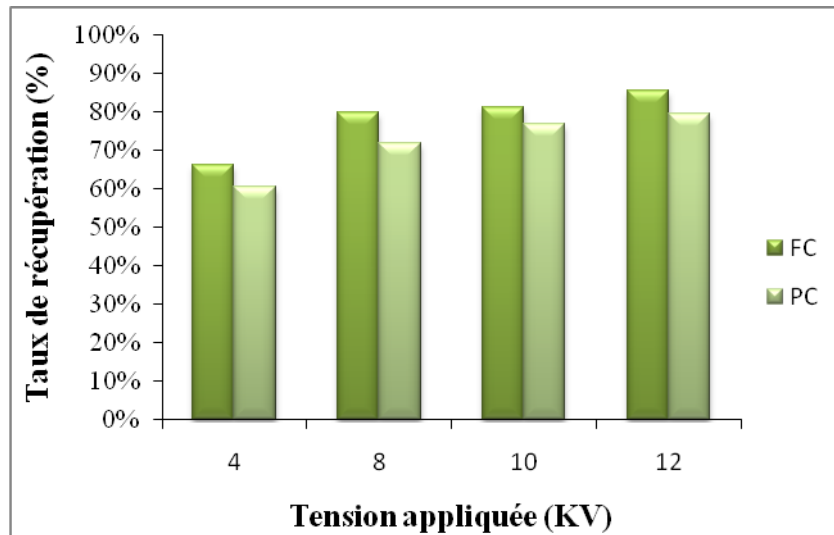


Figure III. 19: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée

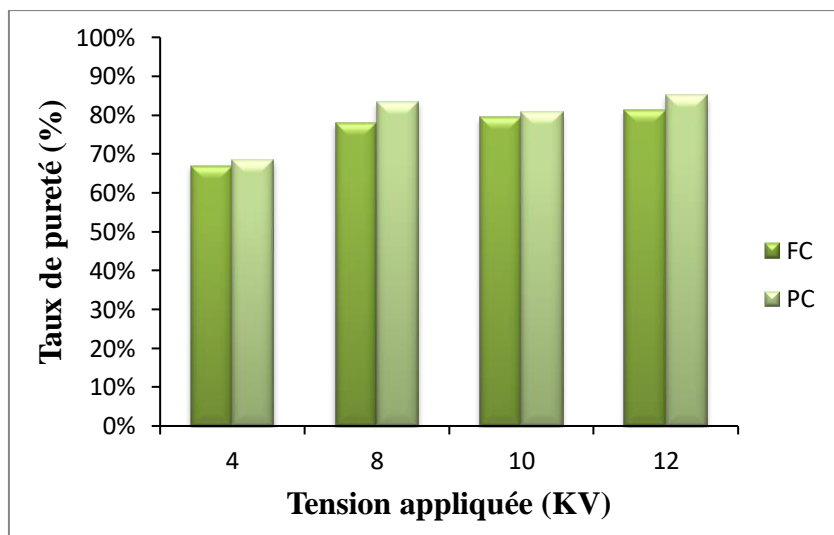
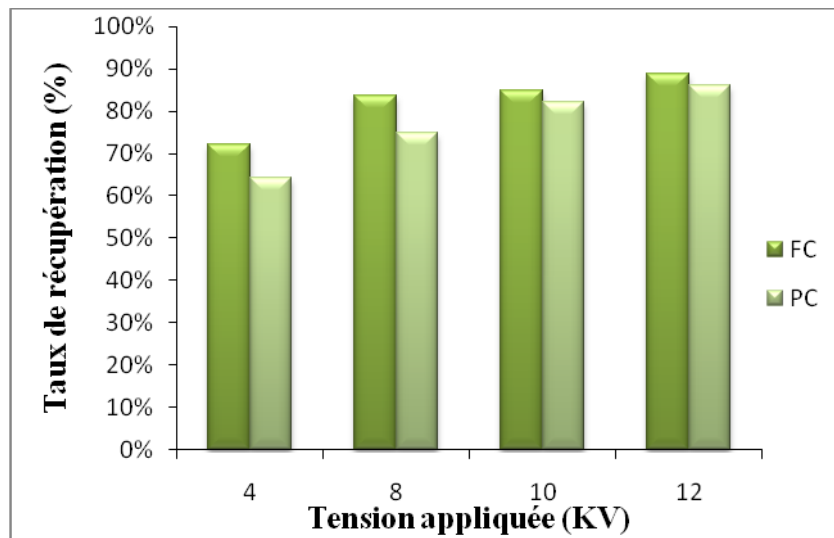
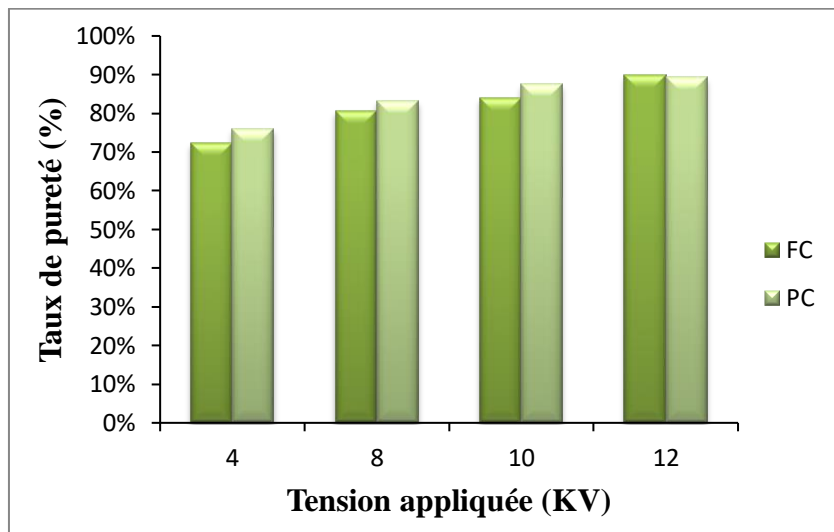


Figure III. 20: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée

⚡ La tension négative/Mise à la terre :**Figure III. 21:** Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée**Figure III. 22:** Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée

⚡ La tension positive /mise a la terre :

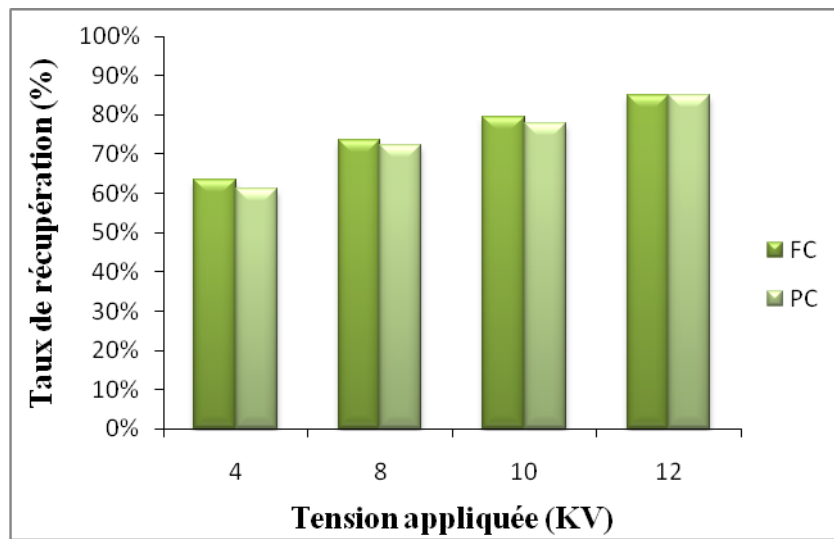


Figure III. 23: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée

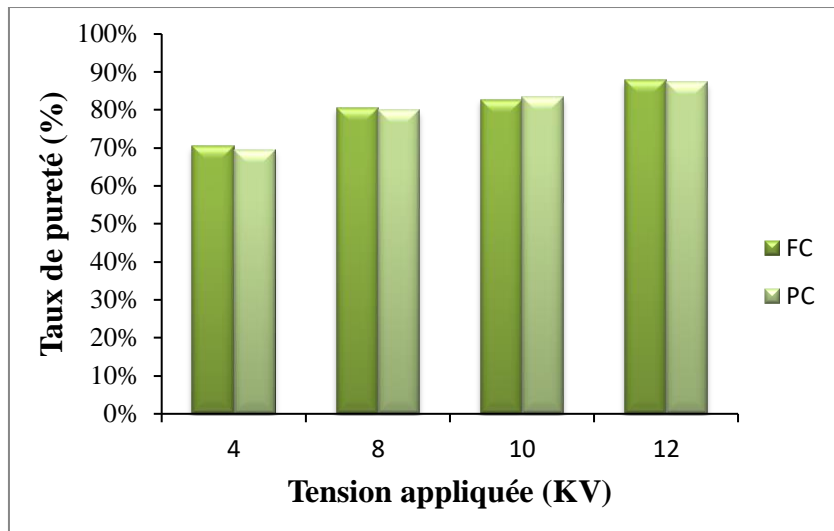


Figure III. 24: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée

- La tension positive ou négative appliquée offre le meilleur taux de récupération pour la fibre, atteignant 85,57 % à 12 kV, bien que sa pureté soit légèrement inférieure par rapport aux autres configurations.
- D'un autre côté, la tension négative avec mise à la terre permet une répartition plus uniforme, avec une récupération équilibrée (PC : 86,23 %, fibre : 88,71 %) et une pureté du PC améliorée, à 89.37 % à 12 kV. La séparation des particules est fortement influencée par la force électrostatique, mais la force gravitationnelle joue également un rôle clé en stabilisant leur répartition, ce qui permet d'obtenir une homogénéité améliorée.

- En ce qui concerne la tension positive avec mise à la terre, elle optimise la récupération du PC à 84,89 % à 12 kV, tandis que la fibre reste relativement stable à 85,13 %. Cette tension spécifique favorise une séparation plus uniforme, ce qui se traduit par une pureté maximale de 87,33 % pour le PC et de 87,85 % pour le FC.
- En résumé, la configuration avec tension négative et mise à la terre semble offrir les meilleurs résultats, équilibrant récupération et pureté des particules, tout en optimisant la séparation électrostatique et en maintenant une répartition efficace des matériaux. La force électrostatique reste le facteur clé de la séparation, complétée par la force gravitationnelle, qui assure un dépôt stable des particules.

III.4.2 Fibre de carbone de taille 10mm :

III.4.2.1 Influence de la haute tension positive / négative :

Dans la continuité de l'étude, nous examinons un nouvel échantillon constitué de fibres de carbone de 10 mm, traité à l'aide du même séparateur et selon les mêmes conditions expérimentales que précédemment établies.

- U=4KV :

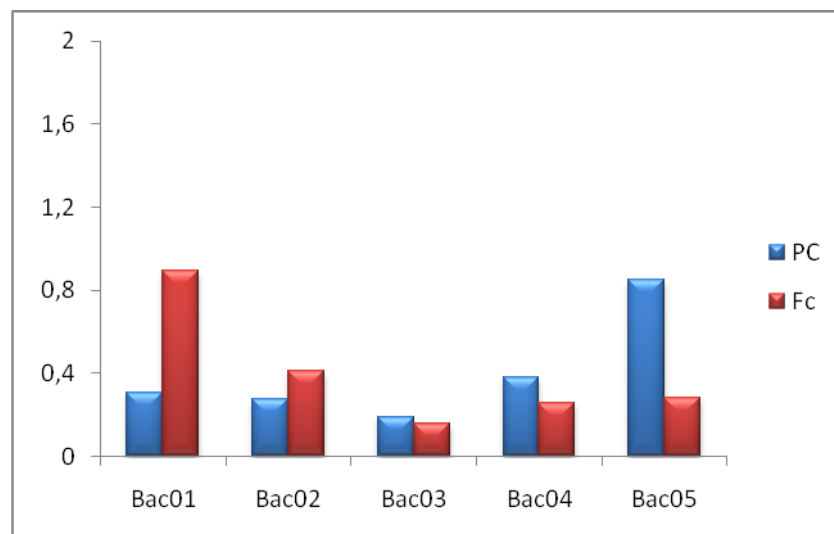


Figure III. 25: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 4KV

➤ U=8KV :

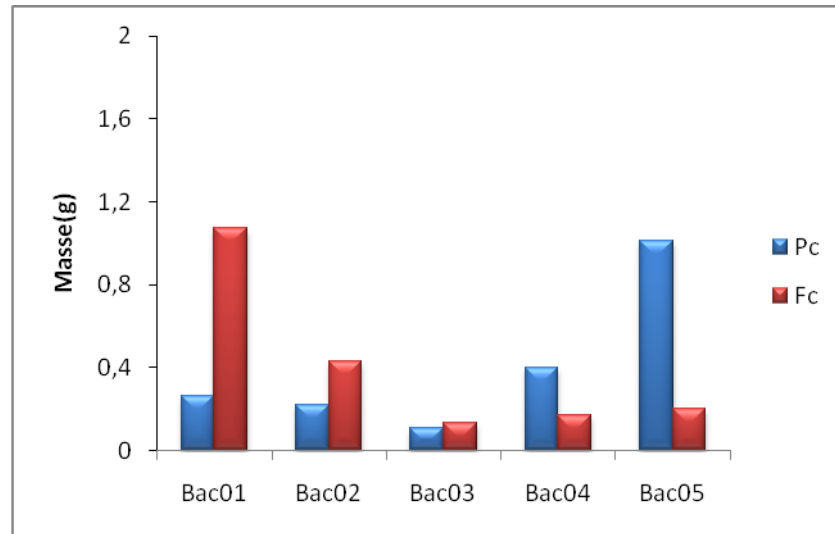


Figure III. 26: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 8KV

➤ U=10KV :

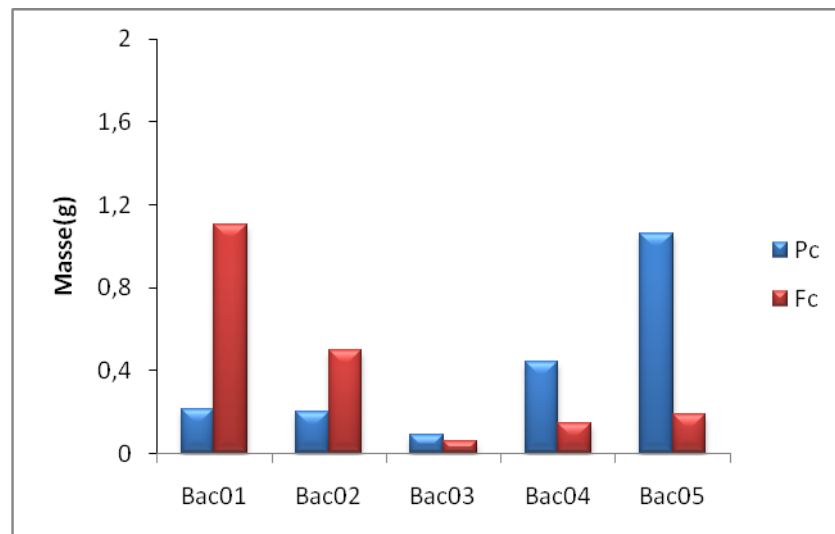


Figure III. 27: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 10KV

➤ U=12KV :

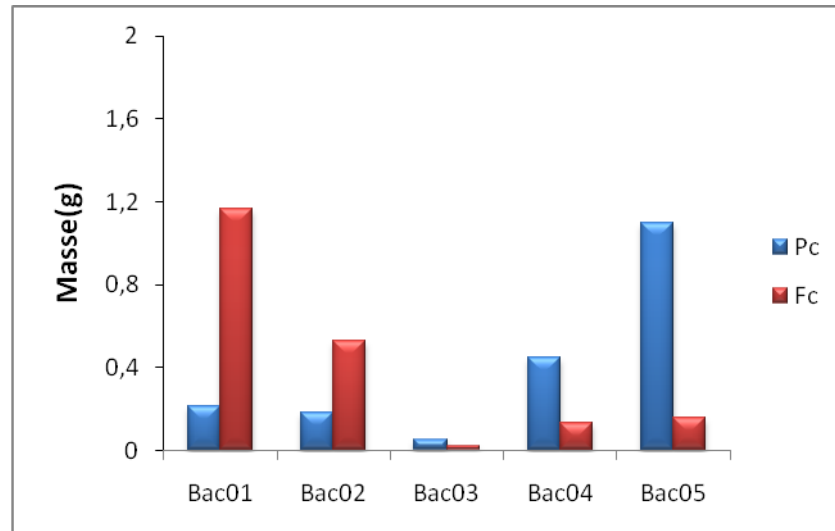


Figure III. 28: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 12KV

a) Interprétation des résultats :

- Les résultats montrent que l'intensité du champ électrique a un effet direct sur la répartition des particules. En effet, plus la tension augmente, plus les masses mesurées dans certains bacs ne varient de manière significative, traduisant un phénomène de séparation sous l'effet du champ.
- À une tension de (4 kV), la masse des fibres reste assez dispersée entre les différents bacs. Cependant, à mesure que la tension monte (jusqu'à 12 kV), une concentration plus marquée est observée, notamment dans le bac 1, où les fibres semblent s'accumuler davantage. Cela montre que la force électrostatique devient prépondérante et parvient à contrer les effets combinés de la gravité et du frottement de l'air, entraînant une déviation nette des fibres vers les zones de faible potentiel.
- Le PC, quant à lui, montre une tendance inverse. Sa concentration augmente dans le bac 5 à mesure que la tension croît, atteignant un maximum de 1,1006 g à 12 kV. Cela révèle une attraction électrostatique efficace dans cette zone pour ce matériau sous champ positif. La force électrostatique semble ici surpasser les forces gravitationnelles et de frottement, favorisant une accumulation dans les régions de champ intense.
- L'intensification du champ provoque une redistribution sélective des particules. Certains bacs recueillent une masse plus importante, alors que d'autres en reçoivent peu. Cela met en évidence une séparation des particules influencée par leur nature, leur charge, leur masse, ainsi que par la résultante des forces qui s'exercent sur elles.

- La polarité du champ semble également jouer un rôle clé. Lorsque la tension est positive, le PC se dirige vers les zones de fort champ (bac 5), tandis que sous tension négative, c'est la fibre qui prédomine dans les zones initiales (bac 1), ce qui reflète une différenciation du comportement électrostatique entre les deux types de matériaux. La force électrostatique change de direction selon la polarité, modifiant ainsi la trajectoire des particules chargées différemment.
- Une observation intéressante est faite à 10 et 12 kV : la masse de PC dans le bac 5 augmente jusqu'à un pic, puis diminue légèrement. Ce phénomène pourrait être dû à des effets de saturation de charge, de redistribution après accumulation ou encore à une modification des forces en jeu avec le temps, notamment la variation du flux d'air ou l'équilibre temporaire entre les forces électrostatique et gravitationnelle. Cela indique un processus dynamique influencé par la durée d'exposition au champ, la charge accumulée, ainsi que l'interaction entre particules.

III.4.2.2 Influence de la haute tension positive/mise à la terre :

- U=4KV :

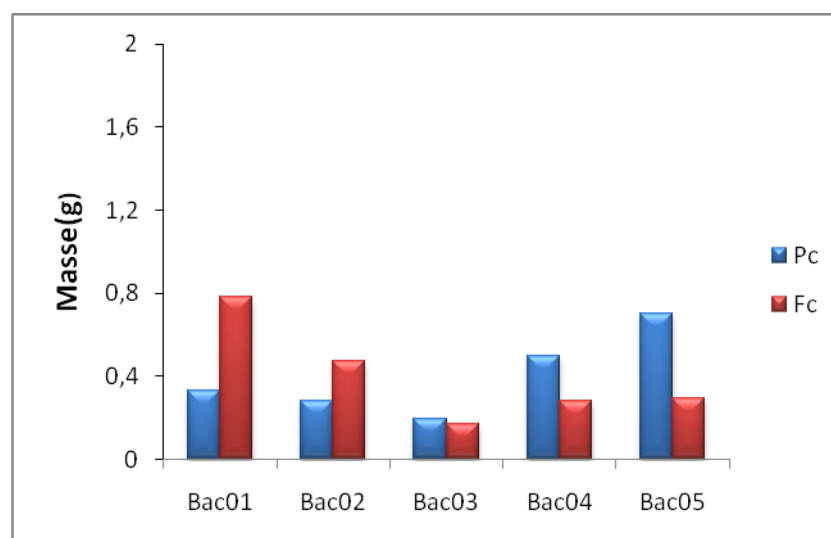


Figure III. 29: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 4KV

➤ U=8KV :

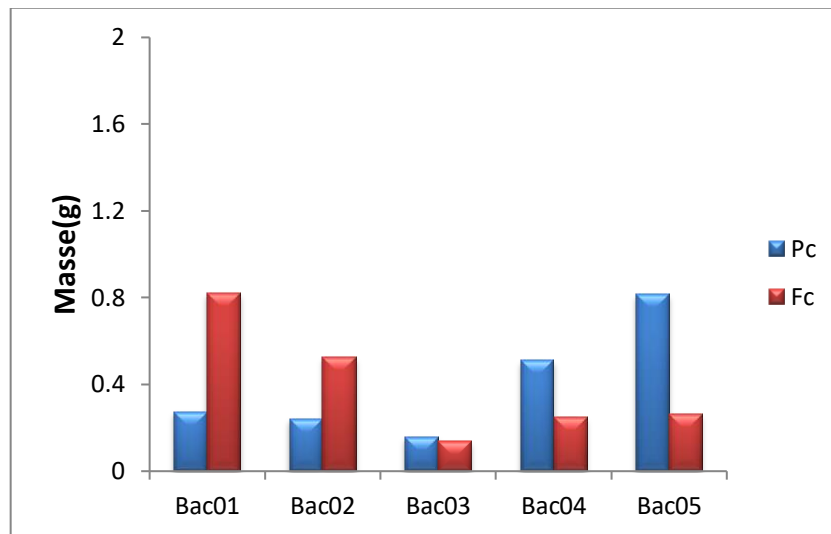


Figure III. 30: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 8KV

➤ U=10KV :

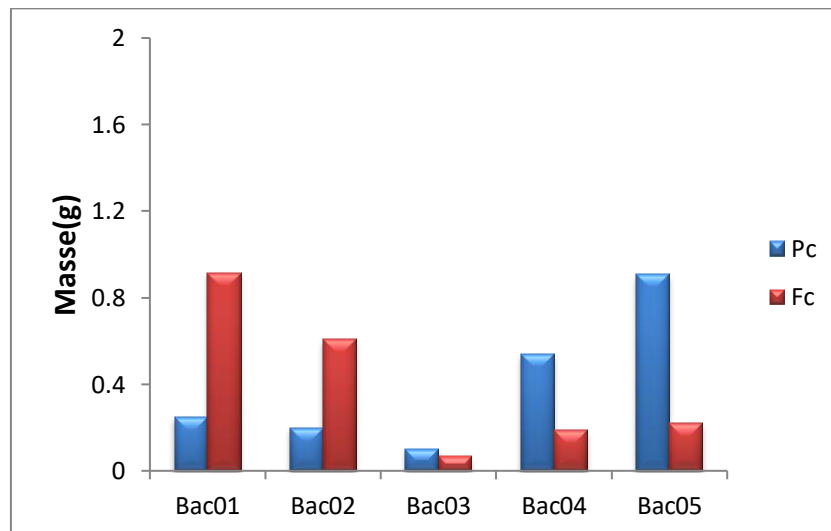


Figure III. 31 : Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 10KV

➤ U=12KV :

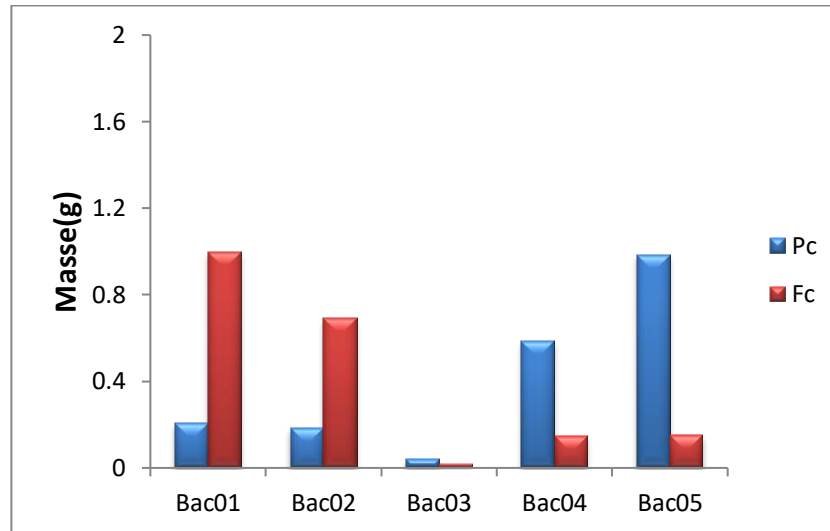


Figure III. 32: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 12KV

a) Interprétation des résultats :

- Les mesures effectuées sur le polycarbonate (PC) et la fibre de carbone (FC) indiquent que la masse déposée augmente globalement avec la tension appliquée (de 4 à 12 kV), ce qui traduit une intensification de la charge triboélectrique. Cette charge accumulée entraîne une force électrostatique plus importante, qui agit comme force motrice sur les particules. À mesure que la tension augmente, le glissement des particules sur les parois augmente également, favorisant un transfert de charge triboélectrique. Plus les particules sont chargées, plus la force électrostatique dépasse la force gravitationnelle qui les attire vers le bas, et plus leur déplacement est accentué malgré la force de frottement et l'effet de l'air ascendant. L'augmentation de la masse déposée est donc la conséquence directe de cette compétition entre forces.
- À 4 kV, les valeurs enregistrées pour les deux matériaux restent faibles et relativement proches, suggérant un faible niveau de chargement initial. À cette tension, la charge triboélectrique acquise est faible, donc la force électrostatique exercée sur les particules est encore inférieure ou comparable à la gravité et à la résistance de l'air. Les particules ont alors un comportement similaire, car ni la PC ni la FC ne sont suffisamment influencées pour se déplacer de manière sélective. La force du flux d'air ascendant, présente dans le système, maintient les particules légèrement en suspension, mais sans effet directionnel significatif.
- À 8 kV, les deux matériaux montrent une augmentation légère mais constante des masses déposées. L'électrisation par contact devient plus efficace, augmentant la

charge portée par les particules. Ainsi, la force électrostatique commence à surpasser le frottement de l'air et, dans certains cas, la gravité, entraînant une déviation plus marquée des particules chargées. La fibre de carbone montre une légère supériorité, ce qui peut s'expliquer par une meilleure interaction triboélectrique avec les parois. Elle est alors plus efficacement mobilisée par le champ.

- À 10 kV, le polycarbonate s'accumule principalement dans le bac 5, indiquant qu'il réagit mieux au champ électrique à cette tension. La force électrostatique devient suffisante pour surmonter la gravité et le frottement, facilitant sa déviation vers les zones de champ maximal. Cela reflète une amélioration du transfert de charge et de la séparation.
- À 12 kV, la fibre de carbone prédomine dans les compartiments proches de l'électrode mise à la terre (notamment les bacs 1 et 2), affichant une masse supérieure à celle du polycarbonate. Ce comportement s'explique par le fait que la fibre de carbone, chargée positivement, est attirée vers l'électrode négative (la terre), tandis que le polycarbonate, chargé négativement, migre vers l'électrode à haute tension positive située du côté du bac 5. La forte tension appliquée intensifie le champ électrique, ce qui améliore la séparation. La fibre parvient à surmonter la gravité et les forces de frottement, se laissant efficacement guider par le champ électrostatique vers la zone de collecte opposée.

III.4.2.3 Influence de la haute tension négative/mise à la terre :

➤ U=4KV :

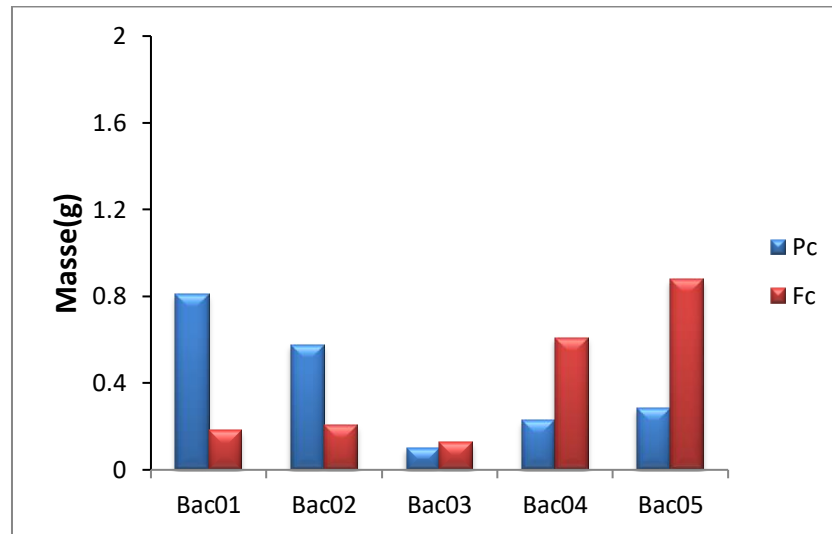


Figure III. 33: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 4KV

➤ U=8KV :

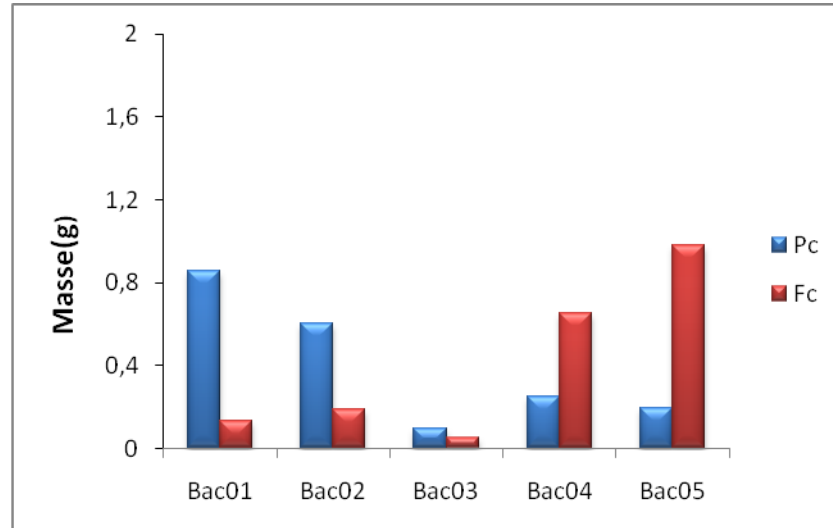


Figure III. 34: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 8KV

➤ U=10KV :

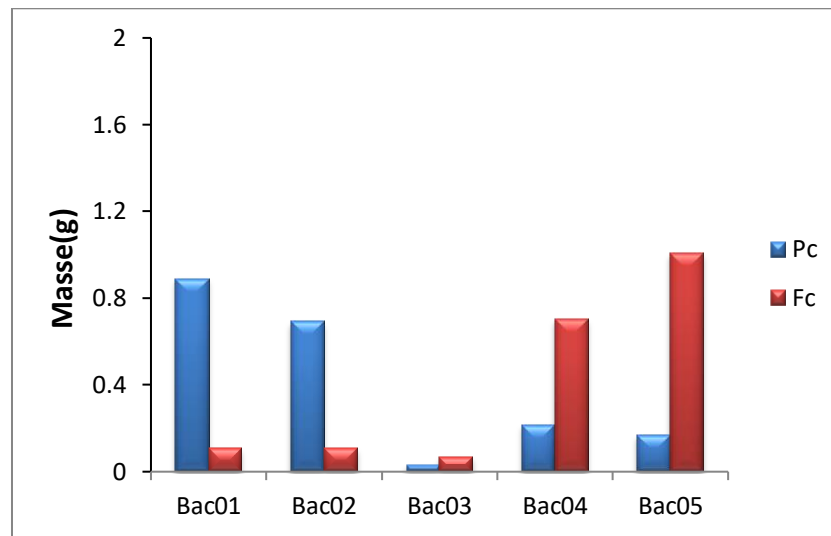


Figure III. 35: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 10KV

➤ U=12KV :

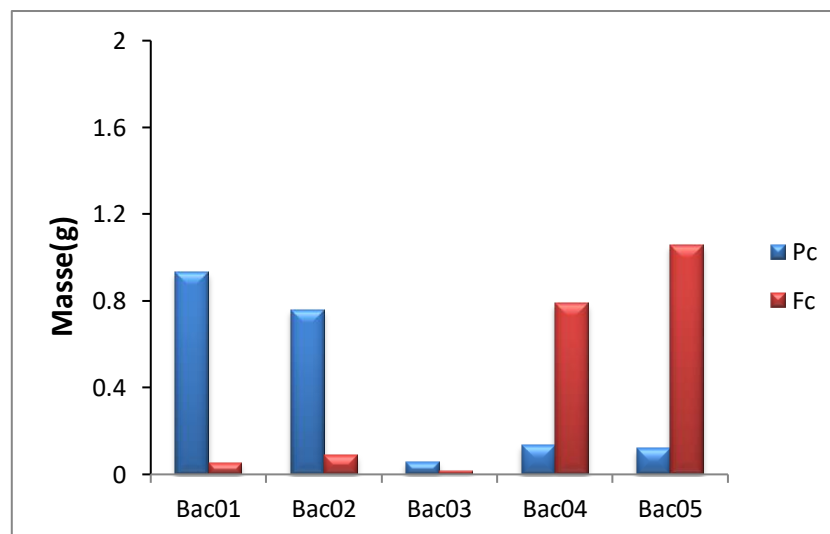


Figure III. 36: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec l'échantillon (PC, FC) à 12KV

a) Interprétation des résultats :

➤ Les résultats expérimentaux montrent que la masse des particules FC (fibre de carbone) et Pc varie en fonction de la tension appliquée sous polarité négative mise à la terre, ce qui influe directement sur leur répartition dans les différents bacs.

Cette variation s'explique par l'effet du champ électrostatique, qui devient plus intense avec l'augmentation de la tension, entraînant une force d'attraction plus marquée sur les particules, donc une répartition différenciée.

- À une tension de 4 kV, la répartition des masses est encore relativement équilibrée, bien que l'on observe une concentration plus marquée de Pc dans les bacs 1 et 2, tandis que FC commence à apparaître dans les bacs 4 et 5. Cela indique que le champ électrostatique est encore insuffisant pour assurer une séparation nette. Les particules restent partiellement dispersées.
- Lorsque la tension est portée à 8 kV, on remarque que Fc migre davantage vers les bacs 4 et 5, particulièrement dans le bac 5. Cela confirme que la force électrostatique commence à attirer les fibres de carbone, qui sont probablement chargées positivement, vers le pôle négatif relié à la terre. La séparation devient plus claire.
- En parallèle, Pc se concentre de plus en plus dans le bac 1, avec une présence très réduite dans les bacs intermédiaires (3 et 4), ce qui montre qu'elle est repoussée par le champ, ou qu'elle subit une moindre attraction électrostatique.

La force gravitationnelle et la configuration du champ contribuent à fixer les particules de Pc dans les zones proches du point d'entrée.

- À 10 kV, la séparation s'intensifie nettement : FC atteint une masse de 1,0074 g dans Bac05, tandis que Pc est largement concentré dans Bac01 (0,8910 g). Cela démontre une réorganisation complète sous l'effet du champ, où chaque type de particule migre selon sa charge et sa nature.
- À 12 kV, l'effet électrostatique atteint son maximum d'efficacité. La fibre de carbone (FC) est quasiment entièrement regroupée dans Bac05 (1,0546 g), tandis que Pc est concentré dans Bac01 (0,9298 g). Les bacs intermédiaires sont presque vides, preuve d'un tri net et efficace. La force électrostatique est ici dominante par rapport à la gravité ou à d'autres effets perturbateurs, assurant un dépôt ciblé des particules selon leur charge.
- Ces observations confirment que la polarité négative de la tension appliquée joue un rôle déterminant dans la séparation des particules.

L'augmentation de la tension améliore l'efficacité de tri, en accentuant les différences de comportement entre FC et Pc. La méthode électrostatique sous polarité négative se révèle donc pertinente, reproductible et fonctionnelle pour des applications de séparation de matériaux chargés.

III.4.2.4 Influence de la tension appliquée sur le taux de récupération et le taux de pureté :

✚ La tension positive / négative :

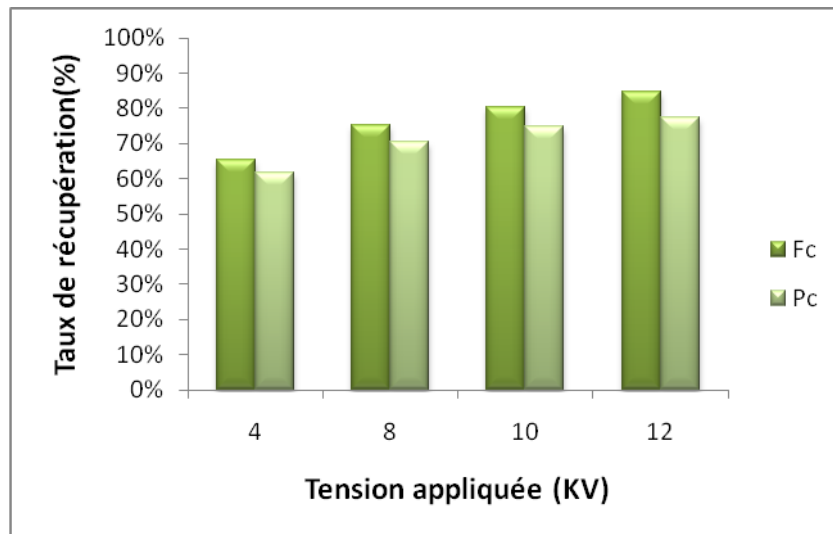


Figure III. 37: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée

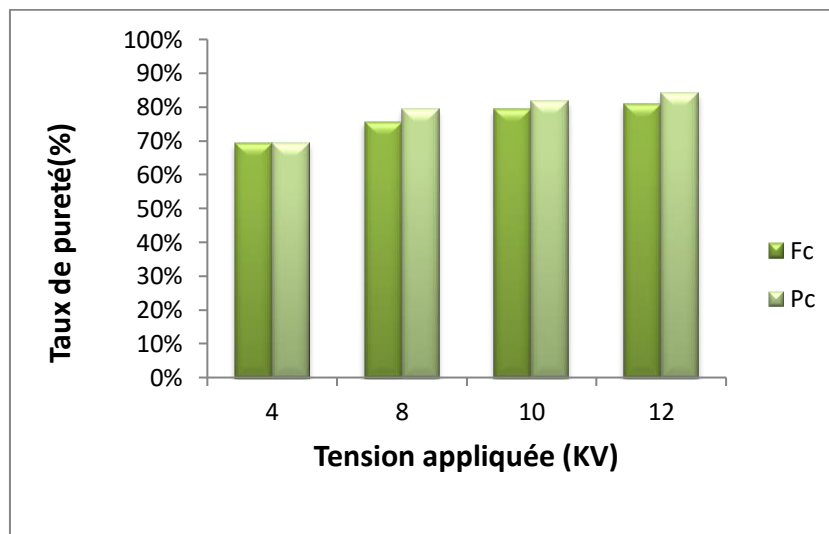
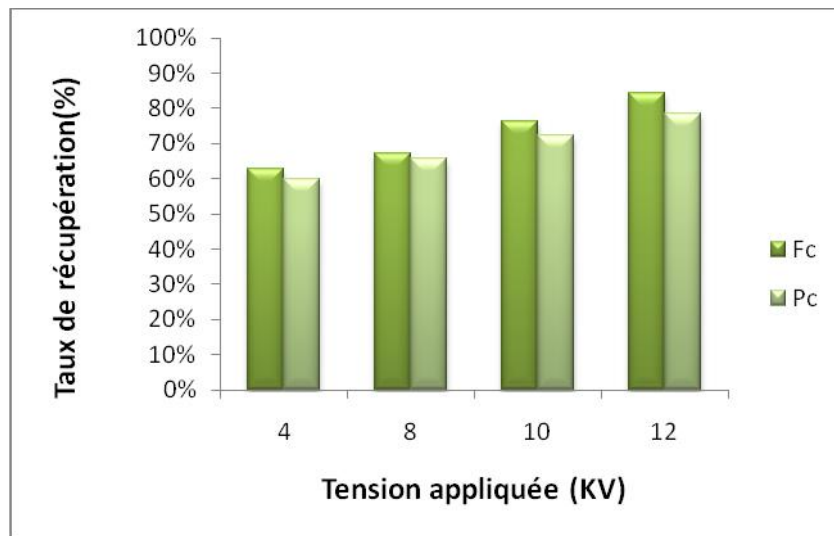
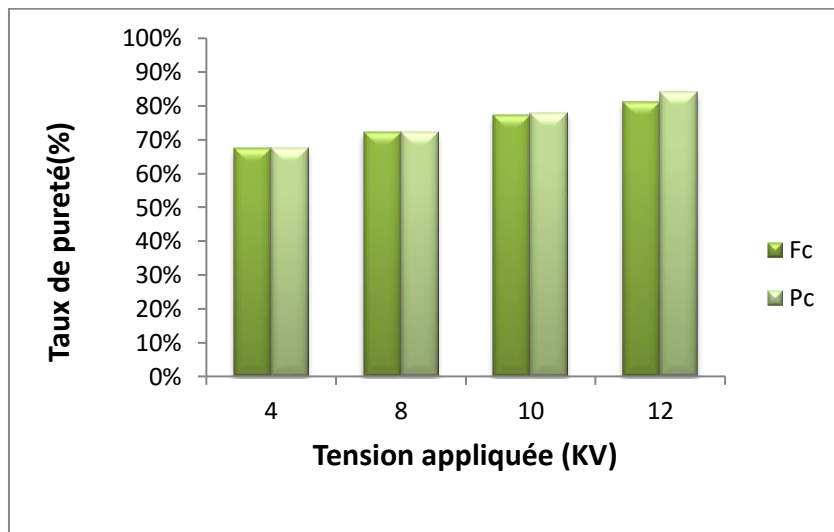


Figure III. 38: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée

⚡ La tension positive/Mise à la terre :**Figure III. 39:** Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée**Figure III. 40:** Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée

✚ La tension négative /Mise à la terre :

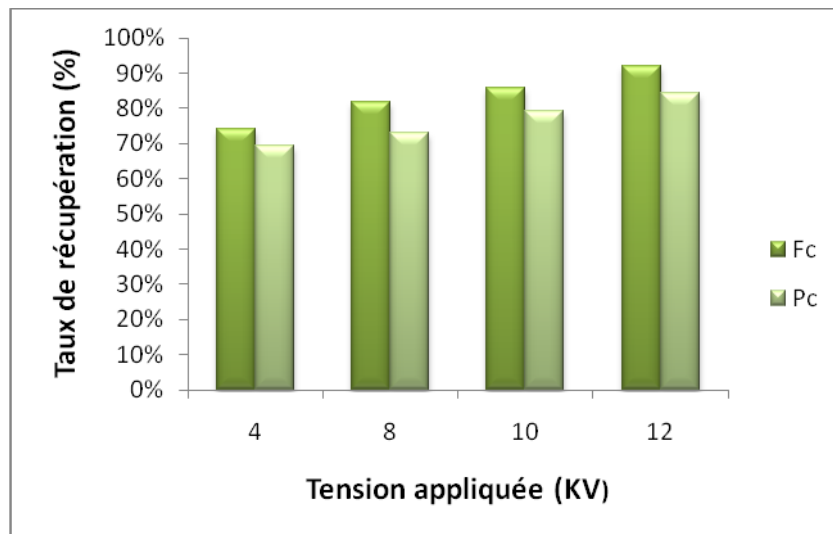


Figure III. 41: Taux de récupération des produits en fonction de la tension appliquée

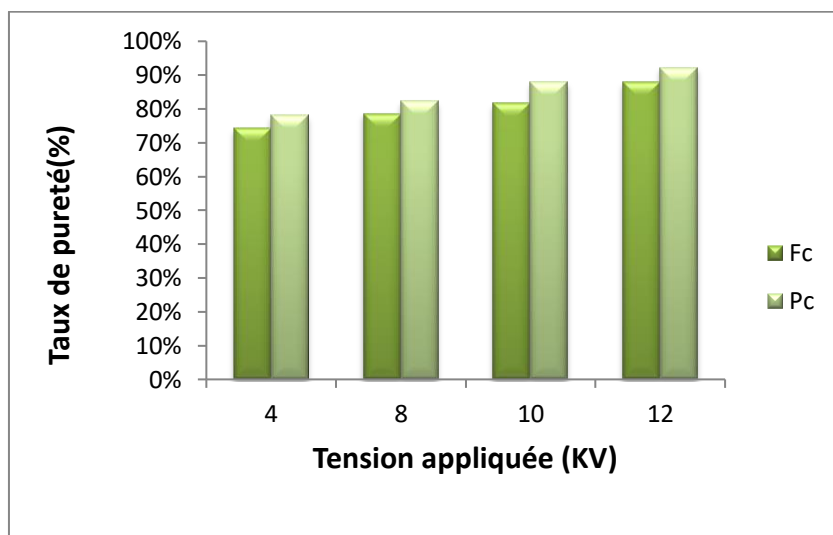


Figure III. 42: Taux de pureté des produits en fonction de la tension appliquée

- La Tension positive ou négative, L'application simultanée de tensions positive et négative montre une efficacité notable en termes de récupération, notamment pour la fibre, avec un taux atteignant 84,61 % à 12 kV, tandis que le PC atteint 77,56 %. Toutefois, la pureté reste supérieure, avoisinant les 84,28 % pour le PC à la même tension. Cette configuration intensifie la séparation électrostatique, mais l'absence de mise à la terre limite la stabilité du dépôt des particules, ce qui se traduit par une séparation moins homogène.
- Tandis que La Tension positive avec mise à la terre permet une récupération efficace et équilibrée, atteignant 78,62 % pour le PC et 84,28 % pour la fibre à 12 kV. La

pureté du PC s'élève à 83,97 %, témoignant d'une séparation relativement sélective. L'effet combiné des forces électrostatiques et gravitationnelles permet une meilleure homogénéité et un dépôt plus stable des particules sur les électrodes.

- Par ailleurs, La Tension négative avec mise à la terre s'impose comme la plus performante. À 12 kV, la récupération atteint 92,125 % pour la fibre et 84,425 % pour le PC, avec un taux de pureté du PC culminant à 92,27%. La séparation est ici optimisée par l'interaction synergique entre la force électrostatique et la force gravitationnelle, assurant une distribution uniforme et stable des particules, ce qui améliore à la fois l'efficacité et la qualité du tri.
- En conclusion, Parmi les différentes configurations la tension négative avec mise à la terre se distingue comme la solution la plus équilibrée, combinant récupération élevée, pureté améliorée et stabilité de la séparation. Elle offre une meilleure homogénéité des fractions récupérées, grâce à l'action conjointe de la force électrostatique pour la séparation et de la gravité pour la stabilisation des dépôts.

III.5 Conclusion :

Les résultats expérimentaux et numériques mettent en avant l'effet direct de la haute tension sur la séparation électrostatique des matériaux. La polarité de la tension appliquée a un impact significatif sur la dynamique des particules : la tension négative favorise l'accumulation des fibres, tandis que la tension positive améliore la récupération du polycarbonate. Grâce aux simulations COMSOL, nous avons pu visualiser les zones de forte intensité du champ électrique, confirmant leur rôle crucial dans la distribution des particules et la sélectivité du tri. De plus, l'étude des courbes de potentiel électrique a révélé une corrélation étroite entre les zones de concentration des particules et la répartition des charges. Les résultats indiquent que pour les fibres de carbone de 10 mm, la configuration avec tension négative et mise à la terre offre les meilleures performances, atteignant un taux de récupération de 92,125 % et un taux de pureté de 81,22 % à 12 kV. En ce qui concerne les fibres de carbone de 3 mm, cette même configuration permet d'atteindre un taux de récupération maximal de 88,71 % et une pureté de 89,93 % à 12 kV. Ces résultats impressionnants confirment que l'intensification du champ électrique améliore le tri électrostatique, en maximisant la séparation des particules et en favorisant une répartition plus nette entre les matériaux. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer les procédés industriels de séparation électrostatique en optimisant les paramètres électriques afin de maximiser l'efficacité et la pureté des matériaux récupérés.

*Conclusion Générale et
perspectives*

Conclusion Générale

Les matériaux composites, en particulier les fibres de carbone, sont largement utilisés dans des secteurs de pointe tels que l'aéronautique, l'automobile et les énergies renouvelables. Cependant, leur coût élevé et les difficultés liées à leur recyclage posent un défi technologique et environnemental majeur. Cette étude s'inscrit dans une approche visant à optimiser la récupération des fibres de carbone recyclées, en explorant la séparation électrostatique comme méthode de tri sélectif efficace et peu énergivore.

Dans la première partie de ce travail, nous avons défini les principes fondamentaux des forces électrostatiques et triboélectriques, ainsi que leur rôle dans la séparation des matériaux granulaires. Une analyse approfondie des fibres de carbone, de leur procédé de fabrication et des différentes méthodes de recyclage actuellement disponibles a permis de comprendre les défis liés à leur valorisation. Pour répondre à ces défis, nous avons conçu et testé un séparateur électrostatique à flux d'air modifié, développé spécifiquement pour améliorer la séparation entre les fibres de carbone recyclées et le polycarbonate.

Nous avons ensuite conçu et testé un séparateur électrostatique à flux d'air modifié, développé pour améliorer le tri des fibres de carbone recyclées et du polycarbonate. L'intégration d'un champ électrique intense combiné à un flux d'air contrôlé a permis de fluidiser les particules et d'orienter leur trajectoire en fonction de leur charge électrique et de leurs propriétés granulaires. Les expériences ont été menées sur des fibres de carbone de taille 3 mm et 10 mm, permettant d'évaluer l'influence de leur dimension sur l'efficacité du tri électrostatique. Les expériences ont confirmé que la polarité de la tension appliquée influence directement la répartition des matériaux, permettant une séparation plus précise et efficace.

Les résultats obtenus ont démontré que la taille des fibres influence directement leur capacité de séparation. Les fibres de 10 mm ont montré une récupération plus élevée et une pureté supérieure par rapport aux fibres de 3 mm, probablement en raison de leur masse plus importante et de leur comportement électrostatique plus stable. En effet, les fibres plus longues sont mieux séparées, car elles réagissent plus fortement aux forces électrostatiques et sont moins influencées par le flux d'air. L'interaction électrostatique entre les particules et le champ généré entre les électrodes est plus efficace avec les fibres de 10 mm, ce qui favorise leur orientation correcte et optimise leur récupération.

Par ailleurs, les fibres plus courtes (3 mm) présentent une plus grande sensibilité aux turbulences créées par le flux d'air et aux effets de friction contre les parois du séparateur. Ces particules sont plus sujettes à des trajectoires aléatoires, réduisant ainsi la précision du tri. La

charge triboélectrique acquise lors du passage dans le séparateur est également moins homogène pour ces fibres courtes, ce qui explique leur pureté légèrement inférieure après séparation.

Les simulations numériques sous COMSOL Multiphysics ont permis de visualiser la distribution du potentiel électrique et du champ électrostatique au sein du séparateur. Ces analyses ont confirmé l'impact du champ sur la trajectoire des particules et ont aidé à affiner les paramètres optimaux du tri électrostatique. Elles ont mis en évidence que les zones de forte intensité du champ électrique permettent une capture plus efficace des fibres de carbone, et que l'ajustement du flux d'air peut réduire les perturbations affectant les particules de plus petite taille.

Perspectives et Travaux Futurs :

Si cette étude a démontré la faisabilité et l'efficacité de la séparation électrostatique pour les fibres de carbone recyclées, elle ouvre également la voie à plusieurs axes d'amélioration :

1. Explorer l'application du procédé à d'autres types de matériaux composites, afin d'élargir les possibilités de tri et de valorisation industrielle.
2. Optimiser les paramètres du champ électrique et du flux d'air, afin d'améliorer la répartition des particules et d'augmenter les performances du séparateur.
3. Développer des dispositifs semi-automatisés, intégrant des systèmes de commande et d'analyse des données pour un contrôle optimisé des conditions de tri.
4. Analyser l'intégration industrielle du procédé, en étudiant son efficacité sur des systèmes de tri de plus grande échelle et ses impacts économiques et environnementaux.

En conclusion, cette étude met en lumière le potentiel technologique et écologique de la séparation électrostatique pour le recyclage des fibres de carbone. En améliorant les procédés de tri et en facilitant leur réintégration dans des applications industrielles, cette approche contribue à une économie circulaire plus durable, réduisant la dépendance aux matières premières vierges et minimisant l'impact environnemental des déchets composites.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] G. Oliveux, L. O. Dandy, and G. A. Leeke, “Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties,” *Progress in Materials Science*, vol. 72, pp. 61–99, 2015.
- [2] <https://www.rmix.it/nouvelles/systemes-de-recyclage-de-la-fibre-de-carbone-technologies-et-applications-post-recyclage-fr/>.
- [3] Mariam Hadadi, « Fibre de Carbone Mini Projet », mars 2020.
- [4] Thibault SIMON et Marie COUDER, « LES FIBRES MINERALES », 2000.
- [5] Adrien GONZALEZ, « Développement de matériaux composites de seconde génération utilisant des fibres de carbone recyclées pour une application nautique », Thèse de doctorat, IMT Mines Alès, 2022.
- [6] Petit Moussally S., Le Bacle C., Vincent R., Guimon M., Roos F., « Les fibres de carbone et de graphite – Éléments pour une évaluation du risque », janv. 2002.
- [7] Belkhiri Youness et al., « Rapport de la recherche sur le matériau de fibre de carbone ».
- [8] <https://lelementarium.fr/product/fibres-de-carbone/>
- [9] « Fabrication et usinage des matériaux composites à base de fibres de carbone », Rapport d’expertise collective, saisine n°2008/002, févr. 2010.
- [10] Babziz Mouad & Bouhadja Brahim, « Séparation électrostatique des matériaux plastiques en utilisant un séparateur à plan incliné », mémoire de fin d’étude Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019/2020.
- [11] Sabrina Jlassi, « Composites à fibres de carbone recyclées : variabilité des sources et optimisation des performances mécaniques », École des Mines d’Albi-Carmaux, 2019.
- [12] Nicolas Mistou, « Recyclage à faible impact environnemental de fibres de carbone continues, issues de composites structuraux époxy/nappes de carbone », Toulouse 3 Paul Sabatier, 2023.
- [13] <https://cordis.europa.eu/article/id/436352-carbon-fibre-recycling-breakthrough-benefits-industry/fr>
- [14] Boussafi Maria, « Simulation des trajectoires des particules isolantes granulaires en plastique dans le séparateur triboélectrique à chute libre », mémoire de fin d’étude, Université d’A. Mira de Bejaia, 2022.
- [15] Khirouni Yassmina, « Étude expérimentale d’un séparateur électrostatique à plan incliné », Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2020.

- [16] Seddiki Youssouf et Mihoub Achraf Aba El Qassim, « Étude expérimentale d'un séparateur électrostatique à chute libre », Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2021.
- [17] <https://www.enviropro-salon.com/fr-fr/toulouse/actualites-La-fibre-de-carbone-recyclee--une-economie-d-energie-de-90-pourcent>

Résumé :

Le recyclage des matériaux composites représente aujourd'hui un enjeu majeur pour l'industrie, notamment dans le cadre du développement durable et de l'économie circulaire. Les fibres de carbone, largement utilisées dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile et des technologies avancées, posent des défis importants en fin de vie, en raison de leur structure complexe et de leur coût de fabrication élevé. Face à ces contraintes, la séparation électrostatique apparaît comme une solution prometteuse pour optimiser le tri et la récupération de ces matériaux, tout en préservant leurs propriétés essentielles.

Ce travail expérimental porte sur la séparation électrostatique d'un mélange de fibres de carbone recyclées et de polycarbonate (PC), à l'aide d'un séparateur électrostatique à flux d'air modifié. L'étude examine l'effet de la haute tension et de la polarité sur les taux de récupération et de pureté des matériaux, ainsi que sur la dynamique des particules soumises aux forces électrostatiques. Afin de mieux comprendre les mécanismes impliqués, des simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics pour visualiser la répartition du champ électrique et affiner les paramètres du dispositif expérimental.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité de la séparation électrostatique pour le tri des fibres de carbone recyclées et ouvrent des perspectives d'optimisation du procédé, dans l'objectif de favoriser une meilleure intégration des matériaux recyclés dans des applications industrielles.

Mots clés : séparateur électrostatique, fibres de carbone recyclées, polycarbonate, triboélectrification, haute tension, simulation numérique, recyclage des composites.

Abstract:

The recycling of composite materials represents a major challenge for the industry today, particularly in the context of sustainable development and the circular economy. Carbon fibers, widely used in the aeronautics, automotive and advanced technology sectors, pose significant challenges at the end of their life, due to their complex structure and their high manufacturing cost. Faced with these constraints, electrostatic separation appears as a promising solution to optimize the sorting and recovery of these materials, while preserving their essential properties. This experimental work focuses on the electrostatic separation of a mixture of recycled carbon fibers and polycarbonate (PC), using an electrostatic separator with modified airflow. The study examines the effect of high voltage and polarity on the

recovery and purity rates of materials, as well as on the dynamics of particles subjected to electrostatic forces. In order to better understand the mechanisms involved, numerical simulations were carried out using the COMSOL Multiphysics software to visualize the distribution of the electric field and refine the parameters of the experimental device. The results obtained confirm the effectiveness of electrostatic separation for the sorting of recycled carbon fibers and open up prospects for optimizing the process, with the aim of promoting a better integration of recycled materials in industrial applications.

Key words: electrostatic separator, recycled carbon fibers, polycarbonate, triboelectrication, high voltage, numerical simulation, composite recycling.

المخلص:

تمثل إعادة تدوير المواد المركبة تحديا كبيرا للصناعة اليوم ، لا سيما في سياق التنمية المستدامة والاقتصاد الدائري. تشكل ألياف الكربون ، المستخدمة على نطاق واسع في قطاعات الطيران والسيارات والتكنولوجيا المتقدمة ، تحديات كبيرة في نهاية عمرها ، بسبب هيكلها المعقد وتكلفة التصنيع العالية. في مواجهة هذه القيود ، يظهر الفصل الكهروستاتيكي كحل واعد لتحسين فرز هذه المواد واستعادتها ، مع الحفاظ على خصائصها الأساسية.

يركز هذا العمل التجريبي على الفصل الكهروستاتيكي لمزيج من ألياف الكربون المعاد تدويرها والبولي كربونات (PC)، باستخدام فاصل إلكتروستاتيكي مع تدفق هواء معدل. تبحث الدراسة في تأثير الجهد العالي والقطبية على معدلات استرداد ونقاء المواد، وكذلك على ديناميكيات الجسيمات المعرضة للقوى الكهروستاتيكية. من أجل فهم الآليات المعنية بشكل أفضل، تم إجراء عمليات محاكاة عددية باستخدام برنامج كومسول متعدد الفيزياء لتصوير توزيع المجال الكهربائي وتحسين معالم الجهاز التجريبي .

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها فعالية الفصل الكهروستاتيكي لفرز ألياف الكربون المعاد تدويرها وتفتح آفاقا لتحسين العملية ، بهدف تعزيز تكامل أفضل للمواد المعاد تدويرها في التطبيقات الصناعية.

الكلمات الرئيسية: فاصل كهرباء، ألياف الكربون المعاد تدويرها، البولي، تريبوليكتريكاتيون، الجهد العالي، المحاكاة العددية، إعادة التدوير المركب.