

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABBES LAGHROUR
KHENCHELA

FACULTE DES SCIENCES & DE LA
TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE
INDUSTRIEL



جامعة عباس لغرور خنشلة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: الهندسة الصناعية

No. Réf. :/...../2022

Mémoire

Présenté par : HARKATI YASSMINA et TLALES RANIA

Pour obtenir le diplôme de MASTER (LMD)

Spécialité : Génie des Procédés et l'environnement

Thème

**Réalisation d'un nano composites à base de
PP/Talc par mélangeage dans un mélangeur
externe**

Devant le jury:

Pr. NEDJAR.Z

Président

U.A.L. K.

Dr. MAKHLOUFI. A

Examineur

U.A.L. K.

Dr. BAHLOULI.S

Rapporteur

.A.L. K.

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord « Allah » qui nous a donné le courage et la patience et la force morale d'effectuer ce travail.

Nous remercions tous les enseignants du département de Génie Industriel, en particulier notre encadreur « Mr.safieddine BAHLOULI» d'avoir proposé le présent sujet et diriger ce travail par ses aides, conseils précieux, ses orientations et sa méthodologie pour aboutir à de meilleurs résultats.

Et enfin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin

« Mille merci à tous »

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que t'a consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu me portes depuis mon enfance.

A mon père, que je n'oublierai jamais tant que je respire et tant que mon cœur bat pour continuer à t'aimer. J'espère que ton âme repose en paix là où tu es et que dieu t'accueille dans son vaste paradis.

A ma sœur, je n'oublierais jamais ton encouragement et ton soutien tout au long de mes études, je t'estime beaucoup et je t'aime beaucoup. Je te souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.

A mon très chères amies SABAH, CHAHINEZ, RANIA, en souvenir de notre sincère de profonde amitiés et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer.

Yassmina

Dédicace

Arrivé au terme de ce modeste travail, grâce à « **ALLAH** »

Il m'est très agréable de le dédié à ...

A la bougie qui a éclairé mon chemin depuis ma naissance, à
Celle dont j'ai prononcé le premier mot, source de ma vie et de

Mon bonheur, à ma mère que dieu la protège.

A mon père, que je n'oublierai jamais tant que je respire et tant que mon cœur bat pour continuer à t'aimer. J'espère que ton âme repose en paix là où tu es et que dieu t'accueille dans son vaste paradis

A mes frères : Miloud et Mounir

Qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études

A mon mari Bachir je ne saurais exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien continu dont tu as toujours fait preuve. Tu m'as toujours encouragé, incité à faire de mon Mieux, ton soutien m'a permis de réaliser le rêve Je te dédie ce travail avec mes vœux de réussite, de Prospérité et de bonheur.

A mes très chères amies : rayane et sihame et dounia et dalalet yassmin

A toute ma famille et à toutes les personnes qui me connaissent.

En fin à tous mes collègues de promotion 2022

A tous qui ont participé de près ou de loin pour l'accomplissement de
ce modeste travail...

Rania

Liste des figures

- Figure I.1:** Production internationale de matières plastiques
- Figure I.1:** Principaux domaines d'utilisation des polymères en Europe
- Figure I.03 :** Déférence entre monomère et polymère
- Figure I.04 :** Polypropylène
- Figure I.05 :** Structure chimique de polypropylènes
- Figure I.06 :** Polypropylène (isotactique et syndiotactique et atactique)
- Figure I.07 :** Déférence entre polymère et copolymère
- Figure I.08 :** Polymerisationziegler-natta
- Figure I.09 :** HDPE2 avec bouteille en plastique
- Figure I.10 :** Pare-chocs
- Figure I.11 :** L'emballage des pots de yaourt
- Figure I.12 :** Équipements de sportswear
- Figure I.13 :** Les dispositifs médicaux
- Figure I.14 :** Lave-vaisselle et boîte de micro-ondes
- Figure II.01 :** Représentation schématique d'un composite
- Figure II.02 :** Talc sous sa forme de poudre et de minerai
- Figure II.03 :** Structure moléculaire du talc
- Figure II.04 :** Schéma du Traitement du Talc
- Figure II.05 :** Domaines d'utilisation du talc dans le monde en 2013
- Figure III.01 :** Modification chimique De la surface Du Talc par Organosilane
- Figure III.02:** Image d'un mélangeur interne : (a) Chambre de malaxage, (b) Géométrie des Rotors contrarotatifs
- Figure III.03:** Organigramme général d'élaboration et caractérisation des différents mélanges
- Figure III.04 :** Dimensions et forme de l'éprouvette utilisée pour les essais de traction
- Figure III.05 :** Dimensions et forme de l'éprouvette utilisée pour les essais de chocs
- Figure III.06 :** Appareil de mesure de l'indice de fluidité
- Figure IV.01 :** Spectre IRTF de polypropylène vierge
- Figure IV.02 :** Spectre IRTF du talc vierge
- Figure IV.03 :** Spectres infrarouges du (a) Silquest A-1100 et de la (b) talc avec le Silquest A-1100 (talc-A1100)
- Figure IV.04 :** Variation du module de Young des composites à charge brute
- Figure IV.05:** Variation du module de Young des composites à charge modifiée
- Figure IV.06:** Variation du Contrainte au seuil d'écoulement des composites à charge brute

Figure IV.07: Variation du Contrainte au seuil d'écoulement des composites à charge modifiée

Figure IV.08: Variation du l'allongement à la rupture des composites à charge brute

Figure IV.09: Variation du l'allongement à la rupture des composites à charge modifiée

Figures IV.10: Variation de la résistance aux chocs des composites à charge brute

Figures IV.11: Variation de la résistance aux chocs des composites à charge modifiée

Figure IV.12: Variation de l'indice de fluidité des composite (PP/talc non modifié)

Figure IV.13: Variation de l'indice de fluidité des composite (PP/talc modifié)

Figure IV.14: Morphologie de polypropylène (PP)

Figure IV.15: Morphologie du polypropylène/ 5% talc brute

Figure IV.16: Morphologie du polypropylène/ 5% talc modifié

Listes des tableaux

Tableau I.01 : Propriétés de polypropylène

Tableau II.01: Donnée sur les productions de minéraux industriels

Tableau II-02 : Composition chimique du Talc

Tableau III.01: Les caractéristiques physiques du polypropylène

Tableau III.02 : Composition chimique de la montmorillonite brute

Tableau III.03: Les caractéristiques physiques types du Silquest A-1100

Tableau III.04: Composition des mélanges à matrice (PP/Talc)

Tableau IV.01: Valeurs du module de Young des différents composites

Tableau IV.02: Valeurs du Contrainte au seuil d'écoulement des différents composites

Tableau IV.03: Valeurs du l'allongement à la rupture des différents composites

Tableau IV.04: Valeurs de la résistance aux chocs des différents composites

Tableau IV.05: Valeurs de l'indice de fluidité des différents composites

Liste des abréviations

PP	Polypropylène
PE	Polyéthylène
PVC	Poly(chlorure de vinyle)
PS	Polystyrène un thermoplastique de grande diffusion.
PPi	Polypropylene isotactique .
PPs	Polypropylene syndiotactique .
PPa	Polypropylene atactique .
FDA	Food and Drug Administration.
3-A Dairy	3-A Sanitary Standards Inc.
HDPE	High-density polyethylene.
TiO₂	Dioxyde de titane .
Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂	Talc.
SiO₂	Silice .
MgO	Oxyde de magnésium .
H₂O	Eau.
HAR	Haute surface spécifique .
IF	Indice de fluidité.
IRTF	Infra rouge à transformer de fourrier.
Silquest A-1100	Aminopyletriéthoxysilane

Table de matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iii
Liste des abréviations	vi
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I: Généralités sur les polymères

I.Généralités sur le polymère.....	03
I.1.Définitions (polymères).....	04
I.1.1. Un monomère.....	04
I.1.2. La Polymérisation.....	04
I.2. Polypropylène (PP).....	05
I.2.1. Structure de polypropylène.....	05
I.2.1.1. Unhomopolymère.....	06
I.2.1.2 Copolymère.....	06
I.2.1.3. Le polypropylène compound.....	07
I.2.2. Chaîne de polypropylène.....	07
I.2.3. Caractéristiques principales.....	08
I.2.4. Propriétés de PP	08
I.2.5. Application PP.....	10
I.2.5.1. Alimentaire.....	10
I.2.5.2. Chimique.....	10
I.2.5.3. Automobile.....	11
I.2.5.4. Emballage.....	11
I.2.5.5. Sport et mode.....	12
I.2.5.6. Applications médicales.....	12
I.2.5.7. Articles ménagers.....	13
I.2.6. Les avantage du PP.....	13
I.2.7. Les inconvénients du PP.....	14
I.3.Conclusion.....	14

CHAPITRE II :Composites à charge particulières

II.1. Composites à charge particulier.....	15
II.1.1. Définitionsde charge.....	15
II.1.2. Charges minérales.....	15
II.1.3. Charges organiques.....	16
II.1.4. Charges renforçantes fibreuses.....	16

II.1.5. Charges renforçantes non fibreuses.....	16
II.1.5.1. Propriétés des charges	17
II.1.5.2. Taille des charges.....	17
II.1.6. Les Charges et pigments minéraux.....	17
II.2. Définitions de talc.....	19
II.2.1. La production industrielle.....	21
II.2.2. Formation du talc.....	22
II.2.3. Utilisations.....	24
II.3. Conclusion.....	25

CHAPITRE III : Partie expérimentale

III.1. Polypropylène.....	26
III.2. Talc (Renfort).....	26
III.3. Agent de couplage (silane).....	29
III.4. Mélanges étudiés.....	30
III.5. Caractérisation des mélanges.....	33
III.5.1. Propriétés spectroscopique IRTF.....	33
III.5.2. Propriétés mécaniques	33
III.5.2.1. Essai de traction.....	33
III.5.2.2. Essais de chocs.....	35
III.6. Propriétés rhéologiques.....	35
III.6.1. Indice de fluidité (IF).....	35
III.7. Propriétés morphologiques.....	36

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV. Résultats et discussions.....	38
IV.1. Infra rouge à transformer de fourrier.....	38
IV.1.1 Spectre du Polypropylène vierge.....	38
IV.1.2. Spectre du talc.....	38
IV.1.3. Spectre IRTF du talc organophylisé par le Silquest A-1100.....	39
IV.3. Etude des propriétés mécaniques.....	40
IV.3.1. Etude des propriétés en traction.....	40
IV.3.2. Résistance aux chocs.....	47

IV.4. Etude des propriétés rhéologiques.....	48
IV.4.1. Indice de fluidité (IF).....	48
IV.5. Etude des propriétés morphologiques.....	50
Conclusions générales et perspectives.....	53
Références Bibliographiques.....	55

Introduction générale

L'incorporation de charges dans les polymères est connue comme l'une des techniques permettant d'améliorer les propriétés des produits finis et d'élargir le domaine d'application des matières plastiques. De plus, elle est un moyen économique de développer un nouveau matériau pour répondre à des applications parfois bien spécifiques. Les charges minérales permettent souvent d'améliorer les propriétés diélectriques, la résistance à la chaleur et les propriétés mécaniques. Les fibres donnent lieu à une interaction importante entre leur surface et la matrice polymère et donc jouent un rôle important de renfort et de résistance à la rupture. Depuis quelques années, une nouvelle famille de polymère chargé apparue comme sous le nom de "nanocomposites". L'idée de départ, qui sous-tend le développement des nanocomposites, consiste à incorporer des nanoparticules dans une matrice polymère. En effet, lorsque ces nanoparticules ou nanocharges sont dispersées dans un polymère, elles peuvent développer une interface bien supérieure aux charges classiques, avec très faible quantité. Or, c'est précisément cette interface qui contrôle l'interaction entre la matrice et la charge, gouvernant les propriétés macroscopiques du matériau final. De plus, certaines propriétés spécifiques ne peuvent être obtenues qu'à l'échelle du nanomètre, comme par exemple les nanoparticules ont des dimensions en deçà des longueurs d'onde de la lumière visible [1].

Il existe une multitude de nanocharges, telles que les argiles, les nanotubes de carbone, le carbonate de calcium ou autres... Parmi elles, le talc, en raison de l'existence de ressources naturelles importantes est facilement exploitable. En outre, il possède une structure en feuillets dans l'épaisseur est de l'ordre du nanomètre. Les propriétés des nanocomposites dépendent de la concentration et de l'état de dispersion dans la matrice. La mesure de l'état de dispersion du talc est un autre enjeu majeur pour l'avenir des nanocomposites. D'autres méthodes indirectes, telles que les mesures rhéologiques ou morphologiques, permettent, cependant d'estimer l'état de dispersion de l'ensemble de la matrice polymère [2].

L'objectif de ce mémoire est de renforcer les propriétés particulières de la matrice composée de polypropylène (PP) sans que cela n'entraîne une baisse trop importante des autres caractéristiques d'une part, et d'autre part démontrer par des combinaisons spécifiques entre charge et polymère permettaient de combler les défauts technologiques. Un traitement de surface de charge était nécessaire afin de réduire l'énergie de surface de cette dernière et ainsi faciliter la dispersion au sein de la matrice PP.

Pour ce travail de notre thèse se divise en quatre grands chapitres:

Introduction générale

Le premier est une bibliographie sur les polymères, en particulier le polypropylène PP car il possède des propriétés très intéressantes et aussi un polymère classique de forte consommation

Le deuxième chapitre consacré à une bibliographie sur la charge (renfort) qui est le talc ;

Le troisième chapitre traite d'une façon détaillé les matériaux utilisés ainsi que les techniques de caractérisation ; consacré aux différents résultats trouvés avec des discussions.

Le quatrième chapitre consacré aux différents résultats trouvés et à leurs interprétations.

Chapitre I

Généralités sur les polymères

I. Généralités sur les polymères :

Depuis le début des années 1950, la production des polymères est en continuelle ascension et avec une pente beaucoup plus élevée que celle des autres matériaux. Ceci peut être aisément observé sur la figure 1 qui représente Production internationale de matières plastiques 2002-2017 Cette production croissante résulte d'une utilisation accrue dans le monde moderne que nous vivons. Les domaines d'utilisation des polymères sont très divers et variés. A titre d'exemple nous présentons dans la figure 2 une estimation faite pour l'année 2002 en Europe des différents secteurs qui les concernent. Nous remarquerons que l'emballage reste le secteur qui consomme le plus de matières plastiques (39%), suivi de celui du bâtiment et des travaux publics (23%) et du domaine des transports (13%) [3].

Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent. Ce chapitre a pour objet une présentation des principales générales sur les polymères, et en particulier le polypropylène.

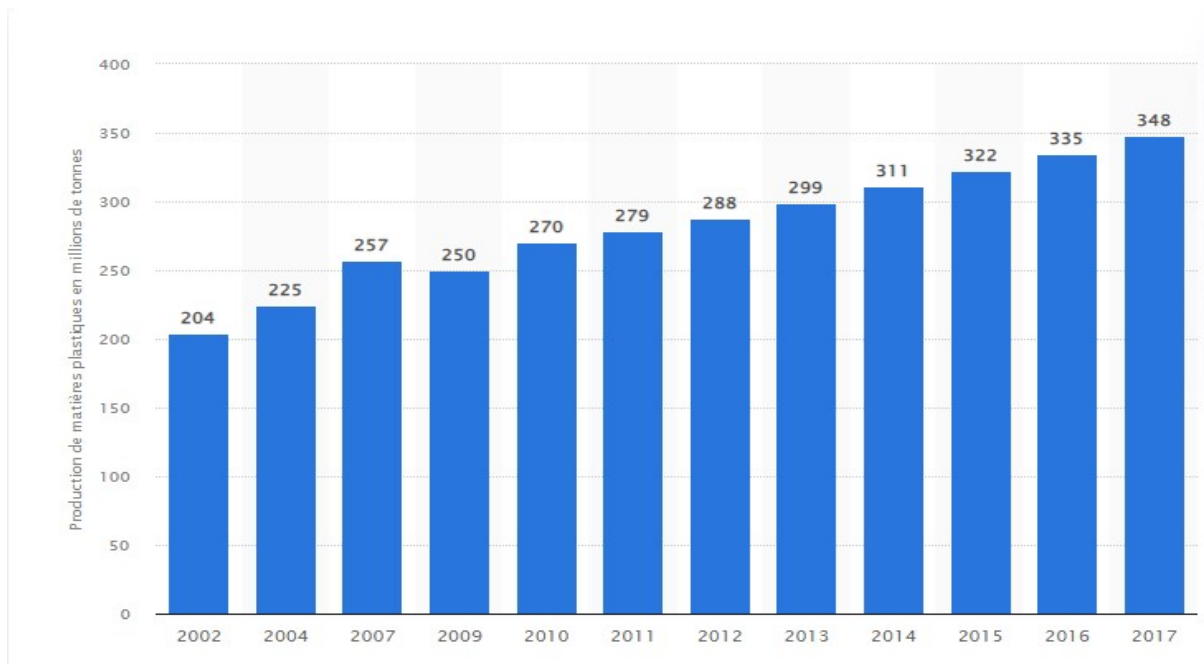


Figure I.1: Production internationale de matières plastiques 2002-2017 [14]

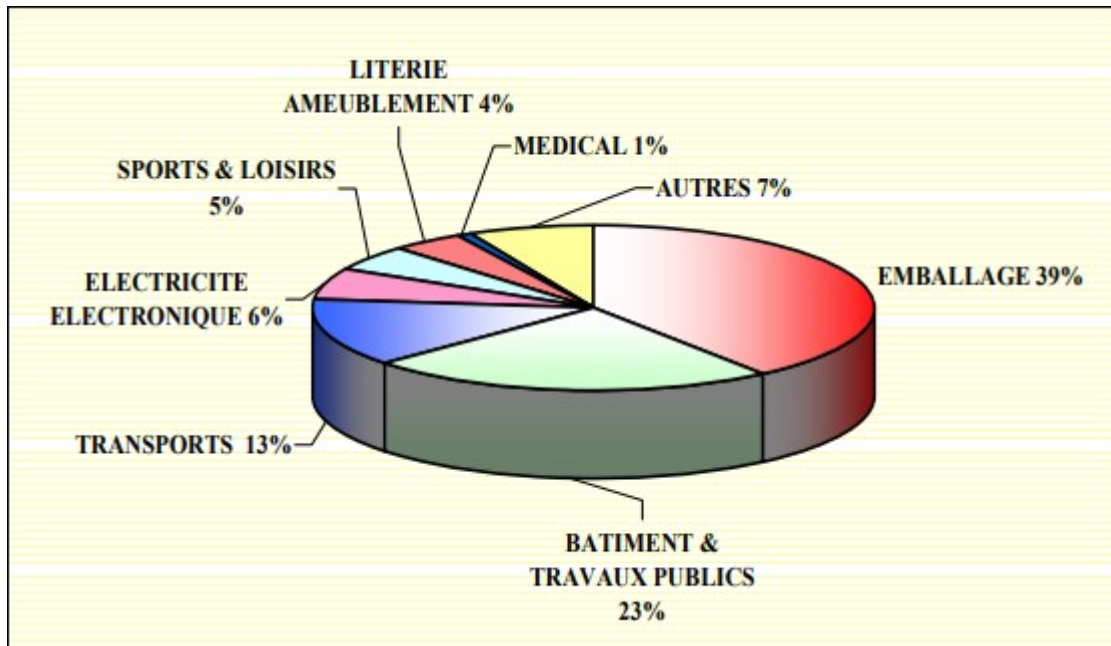


Figure I.2 : Principaux domaines d'utilisation des polymères en Europe en 2002 [3]

I.1. Définition d'un polymère :

Un polymère est une macromolécule organique ou inorganique formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (Figure I.3) composées principalement de carbone (c) et d'hydrogène (h).

I.1.1. Un monomère :

C'est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire. Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère.

I.1.2. La polymérisation :

Est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules. Les noyaux des monomères sont le plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de silicium (polymères siliconés)[6].

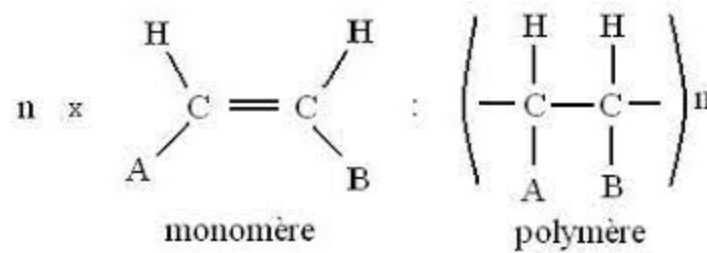


Figure I.3 : différence entre monomère et polymère [15]

I.2. PP (Polypropylène):

Le polypropylène est un polymère thermoplastique développé au milieu du XXe siècle. Au fil des ans, le polypropylène a été utilisé dans de nombreuses applications, notamment comme fibre pour la moquette et le rembourrage de meubles et de sièges de voiture. Le polypropylène a également été une aubaine pour l'industrie des plastiques, offrant un matériau peu coûteux qui peut être utilisé pour créer toutes sortes de produits en plastique pour la maison et le bureau.

Cette matière plastique, aussi connue sous le nom de polypropène et le sigle PP est une **résine semi-cristalline**. Cette matière **plastique isotactique** (structure géométrique régulière) est le résultat d'une **polymérisation** de monomères propylène avec des catalyseurs, selon la catalyse de Ziegler-Natta. [4].

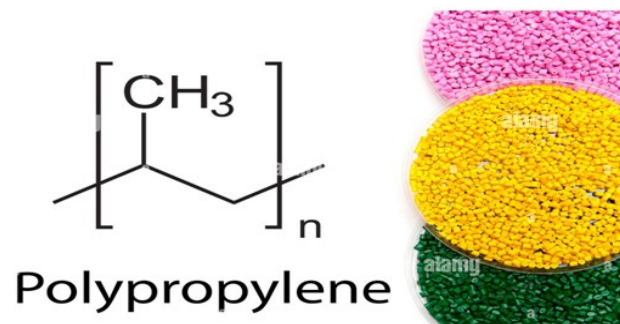


Figure I.4 :Polypropylène [16]

I.2.1. Structure des polypropylènes :

Le polypropylène est, avec un tonnage représentant 21 % du total des matières plastiques, l'un des quatre grands thermoplastiques avec le polyéthylène, le polystyrène et le poly(chlorure de vinyle).

Sous le nom de polypropylène se cache en réalité tout un ensemble de matériaux. On peut au moins distinguer les homopolymères, les copolymères et les compounds. Un homopolymère est préparé en liant chimiquement des unités toutes identiques, le propylène en l'occurrence.

Un copolymère est un assemblage de plusieurs monomères, en général propylène et éthylène, suivant des proportions et des modes variables. Les compounds sont des mélanges plus ou moins complexes [5].



Figure I.5: Structure chimique de polypropylènes [17]

I.2.1.1. Un homopolymère :

est une grosse molécule composée d'un ensemble d'unités (appelé chaînes), mais qui ne comporte qu'un seul motif d'espèce monomère, évitant ainsi la coexistence de plusieurs ensembles de molécules.

Homopolymère PP se présente sous trois formes qui dépendent de la manière dont les groupes méthyle sont ordonnés

- **Polypropylène isotactique** : cristallin, la seule forme véritablement intéressante et produite en grand tonnage.
- **Polypropylène syndiotactique** : actuellement non produit industriellement.
- **Polypropylène atactique**: amorphe et très collant, exploité industriellement, mais en faible tonnage, et pour des applications très différentes de celles du PP isotactique[8].

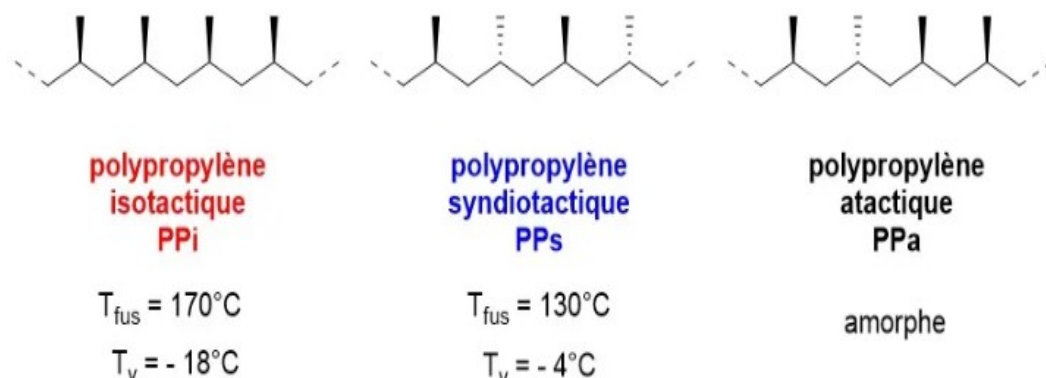


Figure I.6 : Polypropylène (isotactique et syndiotactique et atactique) [18]

I.2.1.2. Copolymère :

est un polymère issu de la copolymérisation d'au moins deux types de monomère, Chimiquement différents, nommés co-monomères. Il est par conséquent constitué d'au moins deux motifs de répétition. Le terme copolymère s'oppose à homopolymère.

L'intérêt des copolymères se trouve dans leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques qui sont intermédiaires avec celles obtenues sur les homopolymères correspondants. Les copolymères à enchaînement aléatoire, alterné et statistique sont des matériaux homogènes. Il en est différemment avec les copolymères séquencés (nommés aussi copolymères *blocs*) : du fait de leur structure hétérogène, il est envisageable d'observer au moins deux Tg [9].

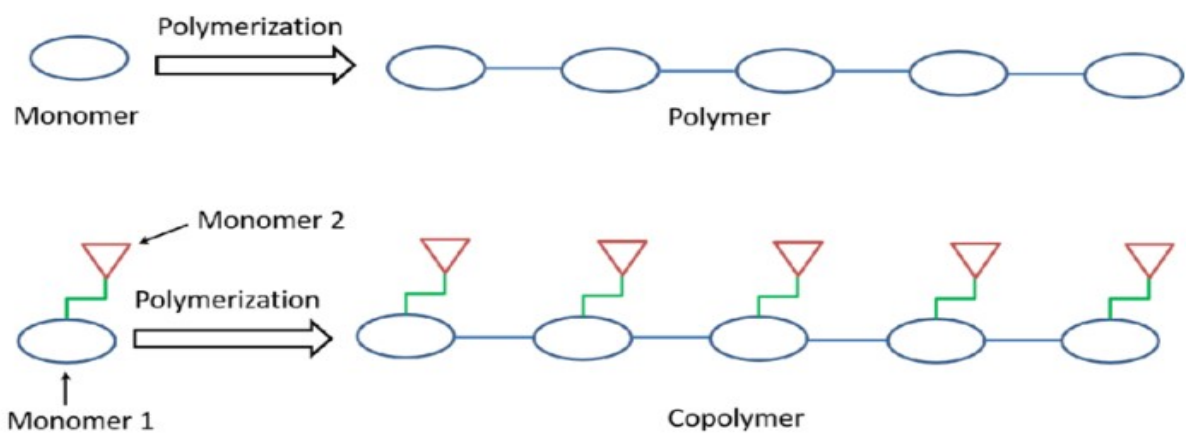


Figure I.7: Différence entre polymère et copolymère [19]

I.2.1.3. Le polypropylène compounds :

(Aussi appelé "polypropylène automobile") est utilisé dans le secteur de l'automobile (intérieur, carrosserie et éléments techniques).

Le **compoundage** est un processus permettant le mélange par fusion de polymères et d'autres substances telles que charges minérales, élastomères et additifs... Il permet de modifier les caractéristiques physiques, thermiques, électriques ou esthétiques des polymères. Le produit final est appelé "compound"[10].

I.2.2. Chaîne de polypropylène :

Structurellement c'est une polyoléfine, et il est similaire au polyéthylène, seulement sur un carbone sur deux de la chaîne principale il y a un groupe méthyle attaché. Le polypropylène peut être fabriqué à partir du monomère propylène par polymérisation Ziegler-Natta et par polymérisation par catalyse par un métallocène[7].

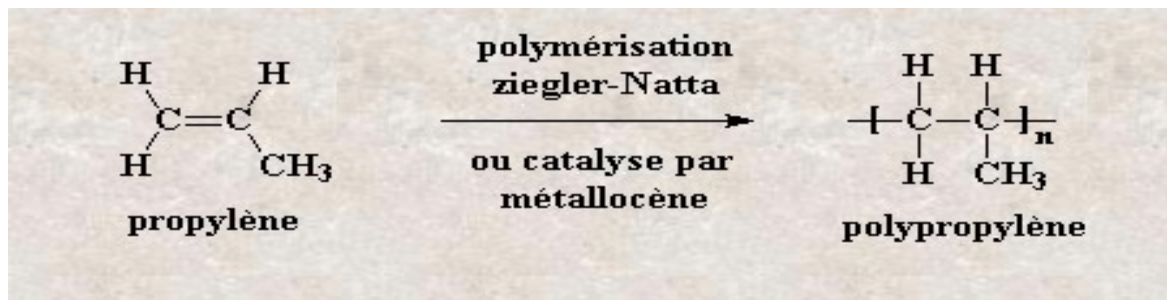


Figure I.8 :Polymerisationziegler-natta[20]

I.2.3.Caractéristiquesprincipales :

Le polypropylène est un polymère très versatile donc une description exhaustive de toutes ses propriétés reliées à ces études

- Faible densité.
- Très grande dureté.
- Très bonne résistance à hautes températures.
- Grande résistance à la fissuration.
- Faible absorption d'eau.
- Grande résistance aux agents chimiques.
- Thermoformable.
- Inertie physiologique (certains PP sont "alimentaires").

I.2.4. Propriétés du Polypropylène

Tableau I.1 : propriétés de polypropylène [21]

	DIN	Unités	Valeurs
PROPRIETES PHYSIQUES			
Densité	53479	g/cm ³	0,91
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	53495	%	0,02
Dureté	53505	Echelle D	73-100
Résilience	53453	KJ/m ²	SR 10
Allongement à la rupture	53455	%	650
Résistance à la traction	53455	N/mm ²	21-37
Module d'élasticité en traction	43457	N/mm ²	130

Etat à 20°C	-	-	Très dur
PROPRIETES THERMIQUES			
T° d'utilisation en continu	52612	°C	-30/+100
T° maxi d'utilisation temporaire	-	°C	140
Point de Fusion	53736	°C	180
Coefficient de dilatation thermique linéaire	52328	10-5 mm/°C	15
T° de déformation sous charge 1,85 N/mm ²	-	°C	65
Conductivité thermique	52612	W/°C.m	0,22
Classement au feu	UL 94	-	HB
Indice d'oxygène	UL 94	%	18
PROPRIETES ELECTRIQUES			
Rigidité diélectrique	53481	KV/mm	80
Résistivité transversale	53482	Q/cm	1018
Constante diélectrique 10 ³ HZ	53483	-	-
Tangente angle perte 10 ³ Hz 10exp6 HZ	53483	-	-

PROPRIETES CHIMIQUES	
Résistance	Acides, alcalis, solutions salées, solvants, alcools, benzine, eau, huiles, graisses, détergents, jus de fruits, lait.
Non-résistance	Acides oxydants, hydrocarbures aromatiques, xylol, éviter le

	contact avec le cuivre
--	------------------------

Procédé	Gamme de température (°C)	Informations complémentaires
Injection moulage	200-280	Technique très facile à utiliser grâce à la grande fluidité du polymère fondu.
Extrusion soufflage	175-230	
Soudage	220	Il est effectué au chalumeau à l'aide d'air ou d'un gaz inerte chauffé et également au moyen de plaques et de miroirs chauffants. Les ultra-sons peuvent également être utilisés.
Projection	230-260	Les revêtements de surface sont réalisés par projection de poudre à l'état fondu à l'aide d'un pistolet chauffant
Usinage	Température ambiante	Il ne présente aucune difficulté particulière exceptée la formation de poussières.
Filage	Température ambiante	Il permet d'obtenir des monofilaments étirés et des fibres sans l'intervention de solvants.

I.2.5.Application de PP:

I.2.5.1. Alimentaire :

Puisqu'il est conforme aux exigences de la FDA (Food and Drug Administration) et de la 3-A Dairy (3-A Sanitary Standards Inc), le polypropylène peut être en contact direct avec des denrées alimentaires. Outre la conception de bassins, on l'utilise aussi dans la fabrication de structures ou de pièces destinées au secteur alimentaire.

I.2.5.2. Chimique:

Tout comme le HDPE (**high-density polyethylene**), le polypropylène possède une très bonne compatibilité chimique. Il peut donc être utilisé pour stocker une grande variété de produits chimiques tout en conservant ses propriétés de départ. Pour en apprendre davantage [11].



Figure I.9 :HDPE 2 avec bouteille en plastique [22]

I.2.5.3. Automobile :

Pourquoi ? Comme que le PP est flexible, économique, longue durée et résiste aux températures élevées, il est souvent utilisé pour les revêtements, les pare-chocs, les composants internes tels que les tableaux de bord, les batteries de voiture et bien plus encore.



Figure I.10:Pare-chocs [23]

I.2.5.4. Emballage:

Pourquoi ? Ici aussi, la flexibilité du polypropylène en fait un « incontournable » idéal pour une large gamme d'emballages. Sûr pour le contact alimentaire et résistant chimiquement, il est souvent utilisé dans trois secteurs principaux : le tabac, l'habillement et l'emballage des aliments/confiseries. Il s'agit entre autres de caisses, de bouteilles, de flacons pour les détergents et les articles de toilette, et des contenants d'aliments à parois minces comme ceux des pots de yaourt.



Figure I.11 :L'emballage des pots de yaourt [24]

I.2.5.5. Sport et mode :

Pourquoi ? Parce que le PP est plus résistant au feu que la laine, l'industrie de la mode et du sport utilise également ce plastique. En outre, en raison de sa résistance aux facteurs environnementaux tels que le soleil, la moisissure, l'eau et les influences bactériennes, le PP est utilisé pour de nombreux appareils d'extérieur, équipements de sportswear, sous-vêtements et accessoires tels que les sacs de course.



Figure I.12 : équipements de sportswear [25]

I.2.5.6. Applications médicales :

Pourquoi? Le PP a également connu une croissance dans le secteur médical. Le polypropylène conserve la capacité de résister aux détergents riches en produits chimiques, aux désinfectants, aux solvants et aux températures élevées, ce qui en fait un plastique fiable pour les seringues, les flacons médicaux, les flacons d'échantillons et les contenants de pilules. En résumé, les utilisations des PP dans les applications sont divisées en trois grandes catégories : les dispositifs médicaux, l'emballage médical en général et les systèmes d'emballage pour les produits pharmaceutiques solides et liquides.



Figure I.13 :Les dispositifs médicaux[26]

I.2.5.7. Articles ménagers :

Pourquoi ? Très probablement, vous en trouverez beaucoup dans votre maison. Résistant à la chaleur et aux taches, flexible et longue durée, le polypropylène est utilisé dans la création de produits de consommation courante tels que les tapis, les moquettes, les paillasons, les conteneurs pour micro-ondes, les assiettes, les jouets et les valises. En outre, il peut être trouvé dans de nombreux autres appareils électroniques internes tels que dans les machines à laver et les lave-vaisselles [12].



Figure I.14 :Lave-vaisselle et boîte de micro-ondes[27]

I.2.6. Les avantages du polypropylène :

Quelles que soient sa taille et son utilisation, ce matériau offre des avantages uniques qui le rendent très recherché et utilisé.

- Résistant à l'eau, aux produits chimiques et aux détergents.
- Très résistant à la corrosion et aux produits chimiques.
- Malléable et résistant à la fatigue.
- Résistant au gel.
- Il peut être façonné et remodelé plusieurs fois sans se dégrader.

- Classé comme isolant.
- Haute résistance à la traction : il peut résister à 4 800 psi.
- Densité inférieure à d'autres plastiques, ce qui permet d'alléger le produit fini[12].

I.2.7 les inconvénients du polypropylène :

Il ne fait aucun doute que le polypropylène a de nombreux avantages, mais l'utilisation de polymères de cette nature présente des inconvénients.

Un des principaux inconvénients du polypropylène est que le produit résiste à l'ajout de peinture ou d'encre une fois le processus de refroidissement terminé. Cela peut rendre la matière première plus difficile à manipuler, en particulier dans les applications où le polypropylène est utilisé pour créer des produits ménagers, tels que des organisateurs d'étagères. Les fabricants doivent faire très attention à ajouter la bonne quantité de couleur au bon moment dans le processus de refroidissement, sinon le matériau sera beaucoup plus susceptible de se fissurer.

S'agissant de l'utilisation du polypropylène dans les tapis et les tissus d'ameublement, les fabricants de textiles doivent être constamment informés de la température de la machine pendant le traitement de la fibre. Si la fibre devient trop chaude, il y a tendance à se casser et à se coincer sur les rouleaux de nombreux types de machines textiles. Les machines à carder, à filer, à tordre et à déformer doivent être surveillées de près pour s'assurer que la fibre raffinée ne se coince pas et commence à s'accumuler autour d'un rouleau. Lorsque cela se produit, le matériau a tendance à fondre et à durcir pour devenir une substance extrêmement difficile à ébrécher.

Le produit fini doit également faire l'objet d'une attention particulière. Le polypropylène a tendance à se contracter après avoir été tissé dans un motif ou un motif. En tenant compte du taux de retrait moyen du polymère, il est possible pour les fabricants de déterminer avec précision la quantité de fil de polypropylène ou de feuilles de matériau tissées à acheter. Lorsque cela est fait, il est beaucoup plus facile de calculer la quantité correcte de rognage qui peut être effectuée tout en produisant un produit aux dimensions appropriées [13].

I.3.Conclusion:

Comme vous avez pu le constater, le polypropylène est utilisé dans presque tous les secteurs. Des produits de tous les jours à la protection d'équipements médicaux ; il serait difficile d'imaginer un monde sans ce matériau longue durée et polyvalent. En règle générale, le polypropylène offre de nombreux avantages et une garantie élevée de durabilité et de fiabilité, le rendant presque unique en son genre.

Chapitre II

Composites à charge particulières

II.1. Composites à charge particulières:

Un matériau composite est un matériau composé de plusieurs matériaux de nature ou d'origine différentes et dont les caractéristiques mécaniques sont supérieures à celles des matériaux entrant dans sa composition.

La condition fondamentale pour que cette définition soit valide, est que la cohésion de l'ensemble soit assurée par des liaisons mécaniques, physiques ou chimiques, La phase inorganique est constituée par les charges qui renforcent le matériau. Ces charges sont liées à la matrice par l'intermédiaire d'un silane et permettent notamment d'augmenter les propriétés mécaniques (résistance à la traction, flexion, compression) des composites.

Elles diminuent également les contraintes dues au retrait de polymérisation, compensent le coefficient de dilatation thermique trop élevé de la phase matricielle et donnent au matériau sa radio-opacité (visualisation radiographique). [28]

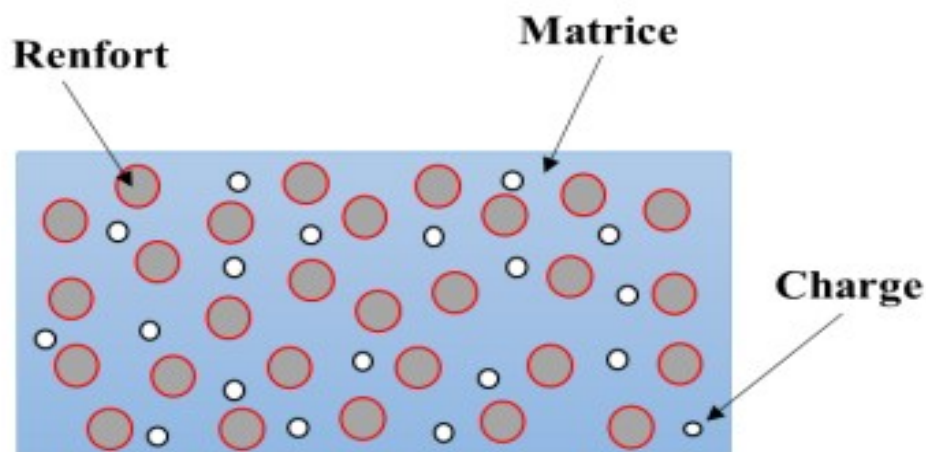


Figure II.1: Représentation schématique d'un composite [29]

II.1.1. Définitions de charge:

Dans une formulation, une charge est une substance solide, non miscible et dispersée par un moyen mécanique dans une matrice. Elle est introduite dans un mélange pour surtout diminuer le coût, perfectionner certaines propriétés ou modifier la densité.

Son taux d'incorporation massique fluctue de quelques pour cent à plusieurs dizaines de pour cent (jusqu'à plus de 100 % d'incorporation dans le matériau final pour certains plastisols).

Pour une utilisation dans les matières plastiques, on distingue (liste non exhaustive). [30]

II.1.2. Charges minérales:

Les charges ont un large éventail d'applications, une grande variété de variétés et une variété de méthodes de classification. Selon la composition du matériau, il est divisé en trois

catégories : les charges organiques et les charges inorganiques, ou les charges minérales, les charges végétales et les charges synthétiques.

- Classé selon la forme géométrique de la charge

Les particules se présentent sous forme de charges, et la forme des particules n'est pas très régulière, mais les formes géométriques des différentes charges présentent des différences importantes. La forme des particules des différentes charges a un impact significatif sur les performances du produit.

- Classé selon la composition chimique de la charge

Dans la modification de la charge, la composition chimique de la charge détermine l'essence de la charge, en particulier lorsque le matériau est doté d'une fonctionnalité, la composition chimique de la charge joue un rôle décisif. Le chercheur américain Hurlbut divise la composition chimique des charges en quatre catégories : oxyde, sel, substance élémentaire et matière organique.

- Classé par application de remplissage

Il existe de nombreux types de minéraux qui peuvent être utilisés comme charges minérales, et ils ont un large éventail d'utilisations. Selon les domaines d'application des charges, elles peuvent être divisées en plus de 10 types de charges telles que les charges en plastique, les charges en caoutchouc, les charges en papier, les charges de peinture et les charges de peinture. [29]

II.1.3. Charges organiques:

Les charges organiques Des charges constituées de résine matricielle polymérisée sont ajoutées au composite pour diminuer la rétraction de polymérisation de la résine et le coefficient d'expansion thermique, améliorer les propriétés optiques et augmenter la dureté du matériau.

Actuellement, on trouve des charges « organiques » : certains fabricants utilisent des charges à base de céramique organiquement modifiée, ce sont les OrMoCers. Il s'agit de macromonomères composés d'un noyau en silice inorganique greffé de groupements multifonctionnels de méthacrylate. On trouve également des charges organo organiques : (+/- 20 µm de Tri Méthylol Propane Triméthacrylate). [28]

II.1.4.Charges renforçantes fibreuses :

Perfectionner les caractéristiques mécaniques, la tenue thermique et la stabilité dimensionnelle (diminution du retrait) (fibre de verre...).[30]

II.1.5. Charges renforçantes non fibreuses:

(Microbilles de verre creuses particulièrement utilisées) nouvelles charges (en 2008) :

- Argile nanométrique, particulièrement fine, incorporée jusqu'à 5 % (pour nano-composites et emballages de bouteilles).
- En réales, jusqu'à 50 % d'incorporation, pour perfectionner la recyclabilité.
- Lin, pour augmenter la dureté du polypropylène.

Exemples d'utilisation : matière plastique, matériau composite, élastomère, pneumatique, pâte à papier, matériaux de construction (béton, asphalte, verre, etc ...), mastic, peinture, cosmétique, dentifrice, chewing-gum, agroalimentaire (pâtisserie...), etc. [30]

II.1.5.1. Propriétés des charges :

- Dureté élevée.
- Inertie chimique.
- Indice de réfraction proche de celui des matrices résineuses.
- Opacité contrôlée par addition de pigments de dioxyde de titane (TiO₂).

L'augmentation du pourcentage des charges à pour effets d'améliorer les propriétés mécaniques (surtout si le taux de charges est > 60% en volume), de réduire la rétraction de polymérisation, le coefficient d'expansion thermique, le coefficient d'absorption et la solubilité hydrique.

L'augmentation du pourcentage des charges et la diminution de la taille de celles-ci ont pour effets d'améliorer l'état de surface - ce qui améliore l'esthétique et diminue l'agressivité du matériau vis-à-vis du parodonte – et d'augmenter la résistance à l'usure du matériau. [31]

II.1.5.2. Taille des charges :

La taille des particules de charge varie de 0,04 µm à 100 µm. On distingue :

- Des macro-charges : grosses particules de verre ou de quartz.
- Des micro-charges ≈ 0,04 µm (silice, SiO₂) .
- Particules de tailles intermédiaires obtenues par fragmentation des macro-charges. [28]

II.1.6. Les Charges et pigments minéraux:

Les charges et pigments minéraux ont des utilisations pratiques quasiment illimitées et dont le champ d'application s'étend en permanence. Depuis longtemps déjà, leur fonction n'est plus seulement de favoriser le remplissage volumique, mais surtout d'améliorer les médiums d'utilisation ou de conférer à ceux-ci de nouvelles propriétés.

L'intérêt porté à ces produits ne s'est jamais démenti, grâce aux efforts consentis pour les valoriser par des procédés physiques (épuration, broyage), et grâce à la conception de

traitements de surface améliorant leur efficacité dans des milieux d'utilisation de plus en plus complexes.

Production mondiale. Niveau de la granulométrie) rend difficile la comparaison des chiffres d'une source à l'autre, malgré les très monographies publiées dans IndustrialMinerals. Les meilleurs renseignements sur les tonnages consommés sont fournis par les industriels utilisateurs, principalement dans les secteurs du papier, de la peinture, du caoutchoute et des plastiques. L'absence de définition rigoureuse d'une charge minérale (en particulier au Le tableau 1 résume, pour les trois minéraux les plus utilisés (carbonates, kaolins, talc).[32]

Tableau II.1:Données sur les productions de minéraux industriels.[32]

Minéral	Procédé de préparation	Tonnages annuels (MT)	Principaux producteurs	Prix (F/kg)
Kaolin	Voie sèche (Air floated) Voie humide (Water washed) Calciné (Calcinated)	-USA 8,5 dont 8 en Géorgie -Amérique latine 1,5 - Europe 5,25 dont Royaume Uni 3,0 Allemagne 0,8 Espagne 0,4 - Pays de l'Est 4,8 dont CEI 3 Tchécoslovaquie 0,58 -Chine 0,5 - Corée du Sud 0,75	USA Georgia Kaolins Thiele Evansclays (Huber Co) ECC, USA et Europe	0,5-1 1,5 à 2,5 traité en surface 1,1 à 1,5 couchage 4 à 5 calciné
CaCO3	Voie sèche Voie humide Précipité	-USA 40, dont les fillers pour bi- tumes routiers (25 compagnies) - Europe 6 à 10<80um (50 compagnies significatives) utilise plus de carbonates naturels que les USA - USA 0,6 -Europe 0,36	USA Pfizer, Franklin Gunstar ECCA Plustaufer (Omya) Georgia Marble Europe, Plustaufer (Omya) ECC France Omya, BMP, SPT, Meac Pfizer, GK Carbonate Solvay ICI	<100am 0,25 <10um 1,8
Talc	Voie sèche Flotté	production mondiale 8 sur 14 pays (pyrophyllite comprise) - USA >1	-USA : CyprusMinerals Pfizer, Vanderbilt	<50 0,6 à 1 <20um 1,5 à 2

	-Chine >1 -Europe 0,8 dont 0,7 au groupe Luzenac 0,33 en France -Inde 0,4 - Brésil 0,4	-Europe Tales de Luzenac Finnminerals Norwegian talc	< 104 2,3 à 5 Selon blancheur et pureté
--	---	---	--

II.2. Définitions de talc :



Figure II.2 : Talc sous sa forme de poudre et de minerai

Le talc est un mot d'origine arabe, ayant deux significations :

- Commerciale : un produit ayant une utilité industrielle, pharmaceutique et cosmétique
- Scientifique : désignant un minéral qui présente un hydro-silicate de magnésium qui vient de la famille des phyllosilicates. Cette famille regroupe les micas, les chlorites ainsi que les argiles.

De son nom INCI Talc, il a comme formule $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ et une couleur variant du vert pomme au blanc argenté quand il est pur. Cependant les différentes impuretés contenues dans le talc font varier sa couleur, comme le graphite qui donne des variétés de talc grises ou franchement noires.

Tableau II.2 : Composition chimique du Talc

Éléments	Pourcentage par poids (%)
Oxyde de magnésium (MgO)	31,7
Dioxyde de silicone (SiO_2)	63,5
Eau (H_2O)	4,8

Le minéral peut admettre dans son réseau jusqu'à 5% de fer en remplacement du magnésium.

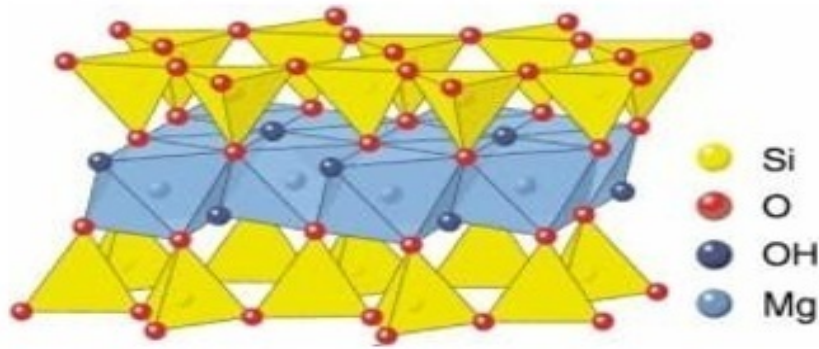


Figure II.3: Structure moléculaire du talc

Au plan moléculaire, l'édifice élémentaire est constitué d'un empilement de feuillets de couches de brucite $Mg(OH)_2$ inter-stratifiées entre deux feuillets de tétraédres siliceux (SiO_4). Dans le motif primitif, la couche de brucite partage les sites oxygènes des sommets tétraédriques de la couche siliceuse, ce qui explique que les liaisons internes sont extrêmement étroites. Elles sont, de plus, presque totalement compensées. Ces deux caractéristiques expliquent le fait que le minéral soit électriquement neutre. Les motifs élémentaires sont reliés entre eux que par des liaisons de Van der Waals. Les caractères hydrophobe et inerte du talc sont expliqués par le fait que les feuillets en couches externes ne montrent ni de groupes OH ni de cations. La structure élémentaire du talc explique également ses différentes caractéristiques telles que son toucher doux et onctueux, sa grande inertie chimique et sa lamellarité.

Une lamelle de talc représente plusieurs millions de feuillets élémentaires. Sa taille peut varier de $1\mu m$ à plus de $100\mu m$ en fonction de la formation du dépôt.

C'est sous forme de plaques que les particules de talc se présentent en majorité. Elles peuvent cependant, mais plus rarement prendre la forme de fibres longues et fines (talc fibreux), en agglomérat dont la séparation se fait facilement (talc asbestiforme). Il est important de ne pas confondre le talc asbestiforme avec le talc contenant de l'amiante.

L'amiante est un terme commercial représentant six minéraux naturels. Les silicates hydratés, divisés en deux ensembles : la serpentine et les amphiboles. L'amiante se présente sous forme fibreuse (asbestiforme) et sa valeur commerciale lui est conférée par différentes propriétés :

- Faible conductivité électrique et thermique.
- Stabilité chimique.
- Durabilité.
- Haute résistance à la traction.
- Flexibilité Etc...

La plus grande partie des données sur les risques pour la santé touchent la terminologie des minéraux commerciaux. Une confusion est cependant existante à la terminologie « amiante » associée à sa nomenclature et ses définitions, qui n'est pas appliqués de façon uniforme par les minéralogistes, les hygiénistes et les médecins du travail, les épidémiologistes, les chimistes ou analystes et les organismes réglementaires. Cette confusion est entretenue par le fait que les différentes fibres sont difficiles à identifier. Effectivement, plusieurs silicates peuvent se présenter sous deux formes : asbestiforme et non asbestiforme. [31]

II.2.1. La production industrielle :

Le talc est généralement exploité en carrières à ciel ouvert. Le plus rarement en mines souterraines. Pour les gisements de tale pur, Extraction sélective est généralement complétée par du tri manuel ou mécanique qui conduit à l'élaboration de différents grades, séparés en fonction de critères minéralogiques, de pureté, couleur, blancheur, granulométrie, qui seront à la base de la gamme des produits commerciaux.

Les minerais mixtes à talc carbonate des gisements de type 3 doivent, pour parvenir au même niveau de concentration, subir au préalable un enrichissement par flottation, en voie humide.

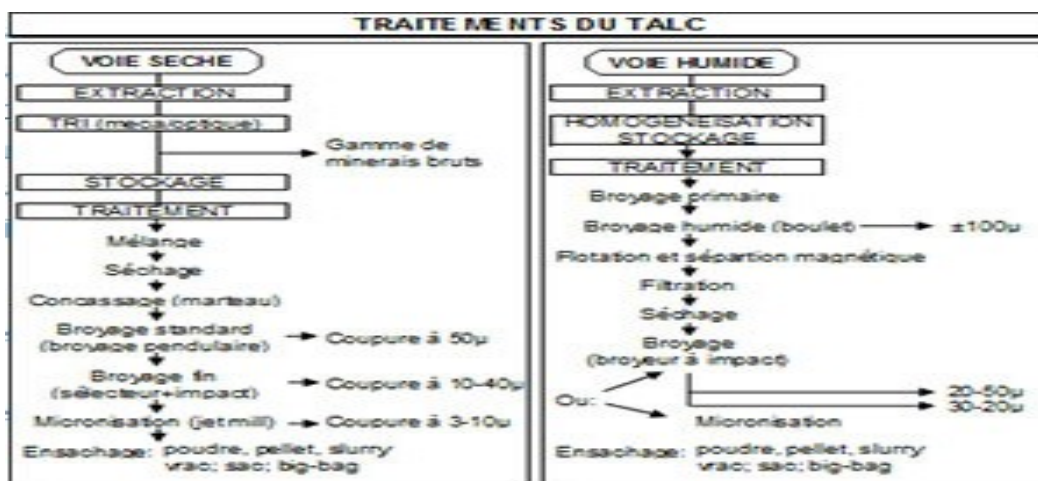


Figure II.4:Schéma du Traitement du Talc

Le talc est un produit naturel dont le traitement se limite le plus souvent à un séchage, broyage et conditionnement. Exceptionnellement il peut comporter un traitement de surface (silane, amine) visant à améliorer ses propriétés, voire une calcination. La technique de broyage la plus répandue pour le talc est celle du broyage pendulaire (type Raymond), qui permet d'obtenir des finesses de l'ordre de 40 µ (qualifiées de standards) avec un effet délaminant, ce qui renforce les propriétés naturelles du minéral. Des produits plus fins (30 µm) peuvent être obtenus soit par sélection des poudres standards, soit après micronisation (microniseurs à impacts) et sélection (15-30 µm). Le broyage à air comprimé ou à vapeur (jet mil) permet d'atteindre des finesses comprises entre 3 et 15 µm. Enfin, des techniques de

broyage humide à effet délaminant permettent d'obtenir des produits à haute surface spécifique (HAR). Une fois broyées, les poudres sont conditionnées en fonction de leur utilisation et de la demande du client. Les talcs très fins et de densité apparente très faible à l'état de poudre sont souvent densifiés (compaction) sous forme de granulés pour faciliter la manutention, le stockage et le transport. On distingue plusieurs formes de produits marchands : la poudre libre et les produits granulés qui peuvent être livrés en sacs, bigbags ou en vrac (citernes), et enfin les slurries (en citernes). Les qualités commerciales se définissent par leur degré de finesse, exprimé en diamètre moyen des particules ou coupure granulométrique (top cut), leur coefficient de forme (lamellarité), leur pureté minéralogique (analyse chimique) et leur blancheur qui est un paramètre qualitatif important. On peut distinguer d'une façon synthétique les niveaux de blancheur suivants :

Produits industriels : bl $Y > 75$ à 83 .

Produits blancs : bi $Y > 83$ à 88 .

Produits extra blancs : bl > 88 à 95

A noter que la blancheur augmente avec la finesse de la poudre. [31]

II.2.2. Formation du talc:

Le talc et les chlorites sont des espèces minérales largement répandues. Nous abordons ici la mise en place des minéralisations de talc qui conduisent à la formation de gisements. La minéralisation des chlorites n'est évoquée que lorsqu'elle est complémentaire au talc. Quatre paramètres majeurs contrôlent la formation du talc.

- **La roche mère:**

Les gisements de talc sont issus de roches mères soit magnésiennes (magnésites, dolomies, ou serpentinites) soit siliceuses (quartzites ou pélites gréseuses).

- **Le fluide:**

C'est sous l'action de fluides hydrothermaux que sont apportés ou mis en solution les éléments chimiques nécessaires à la formation du talc : MgO, SiO₂, CO₂ et H₂O. On parlera dans ces cas d'altération métasomatique : transformation à l'état solide de roches par interaction avec un fluide.

- **Les structures géologiques:**

Dans tous les types de gisement, les structures tectoniques ont un contrôle certain sur la circulation des fluides à grande échelle mais aussi pour la micro-fracturation qu'elle engendre. C'est fréquemment dans des zones de cisaillement que se développe le minéral blanc. La porosité de la roche mère a également un rôle déterminant dans la circulation des fluides minéralisateurs.

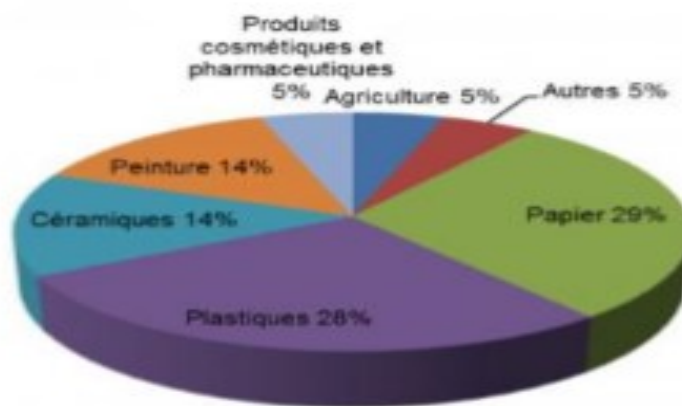
Ces talcs présentent en général une couleur sombre avec un taux de matière organique inférieur à 1%. On parle alors des « black talc ». [33]

II.2.3.Utilisations:

Le talc est utilisé de différentes manières, comme :

- Charges minérales dans de nombreuses industries (papiers, peintures et enduits, plastiques et polymères, caoutchoucs, produits phytosanitaires).
- Intrants dans les céramiques techniques, mes réfractaires, les fibres de verre, les moules de fonderie.
- Produits de base en pharmaceutique et cosmétiques.

La répartition de la consommation mondiale se fait selon les domaines d'utilisation suivant:



Source: Roskill, 2015

Figure II.5: Domaines d'utilisation du talc dans le monde en 2013

Ces différents marchés sont en constante évolution, en effet, cette évolution s’est fortement accentuée depuis 2010, avec une augmentation de la demande des produits de haute pureté pour les plastiques et polymères destinés aux composant de l’industrie automobile. Cependant, dans le secteur du papier, le talc est de moins en moins employé comme charge minérale. En effet, il y a une augmentation de l’utilisation de charges carbonatées tels que les carbonates de calcium naturels micronisés ou les carbonates de calcium précipités à partir de chaux. Cette baisse est également liée à la diminution générale de la consommation du papier. Le marché est en majorité dominé à par égales par l’industrie papetière et celle des plastiques, qui représentent respectivement 29% et 28% des utilisations finales en 2013. Suit par les céramiques, les revêtements, les produits cosmétiques et pharmaceutiques, les phytosanitaires et l’agriculture. [31]

II.3. Conclusion:

Le talc est un terme désignant un minéral provenant de roches métamorphiques, présentant un hydrosilicate de magnésium et venant de la famille des phyllosilicates. Il existe deux formes de talc, asbestiforme (fibreuse) et non asbestiforme (non fibreuse). Ces caractéristiques dépendent de la formation cristalline du talc. Trois familles différencient également le talc, elles sont déterminées par la nature du gisement dont il provient. Ce minéral est utilisé dans différents domaines tels que le papier, le plastique, la céramique, les peintures et en pharmaceutique et cosmétique, entre autres.[31]

Chapitre III

Part expérimentale

**(Matériaux et techniques de
caractérisation)**

III. Matériaux

III.1. Polypropylène :

Le polypropylène noté PP est un thermoplastique de la famille des polyoléfines. Il provient de la polymérisation du propylène. Le mode de synthèse le plus répandu actuellement est le procédé de catalyse hétérogène Ziegler-Natta qui produit du polypropylène isotactique. Polypropylène étudié dans ce travail est un homopolymère isotactique de grade extrusion vendu par la société «Repsol QUIMICA S.A.»(Espagne) **Tableau III.1.**

Tableau III.1: Les caractéristiques physiques du polypropylène [34]

Caractéristiques	Unités	Valeurs	Méthodes
Indice de fluidité à chaud (IF), 230°C/2.16 kg	g/10min.	2.00	ASTM D 1238-826
Masse volumique, M_v	g/cm ³	0.902	ASTM D-1505
Masse moléculaire, \bar{M}_n	g/mol	32000	SPERATI et FRANTA
Taux de cristallinité, χ	%	45.00	DSC
Température de fusion, T_f	°C	167.00	DSC
Contrainte maximale, σ_y	MPa	3.6	
Contrainte à la rupture, σ_r	MPa	2.8	ASTM D-638
Déformation à la rupture, ε_r	%	4.9	
Module de flexion, E	MPa	1500	ASTM D-790
Dureté Shore D		68	ASTM D-2240
Résistance aux chocs, a_K Eprouvette entaillée à 23°C	Kj/m ²	4.4	ASTM D 25-673

III.2. Talc (Renfort) :

Le talc appartient à la famille des phyllosilicates qui regroupe autres les micas, les chlorites, ainsi que les argiles. Les minéraux de cette famille se caractérisent par la propriété remarquable de se débiter en minces feuillets à la façon du mica. Le talc cristallise dans le système monoclinique. Au plan moléculaire, l'édifice élémentaire est formé d'une couche de brucite

$Mg(OH)_2$ interstratifiée entre deux feuilles siliceuses constituées de tétraèdres de types SiO_4 . Dans le motif, les liaisons internes entre les couches sont à la fois extrêmement étroites (la couche de brucite partage les sites oxygène des sommets tétraédriques de la couche siliceuse) et presque totalement compensées, ce qui explique que le minéral est électriquement neutre. En revanche, aucune liaison, autre que celle de Van der Waals, ne relie entre eux les motifs élémentaires. Les propriétés spécifiques du minéral, en particulier ses propriétés de surface (le talc est hydrophobe, lipophile), son toucher doux et onctueux, sa grande inertie chimique et sa lamellarité dérivent de cette structure élémentaire.

Sa formule chimique $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ correspond à celle d'un silicate de magnésium hydraté avec la composition théorique suivante: SiO_2 : 63.27%, MgO : 31.88%, H_2O : 4.75%. Le minéral peut admettre dans son réseau de fer en remplacement du magnésium. A noter que le talc a une sœur jumelle dotée d'une structure moléculaire identique: la phyrophyllite -silicate d'aluminium hydraté- qui peut dans certains cas être utilisée dans les mêmes applications que le talc, comme l'agalmatolithe du Brésil [35].

Le talc est généralement exploité en carrière à ciel ouvert, plus rarement en mines souterraines. Pour les gisements de talc, l'extraction sélective est généralement complétée par un tri manuel ou mécanique qui conduit à l'élaboration de différents grades, séparés en fonction de critères minéralogiques, de pureté, couleur, blancheur, granulométrie, qui seront à la base de la gamme des produits commerciaux. Les principales caractéristiques physicochimiques sont décrites dans le **Tableau III.2**. Le talc est commercialisé par « Cabot France S.A.»

Tableau III.2 : composition chimique de la montmorillonite brute [36]

Constituants	Composition pondérale
SiO_2	62.92
Al_2O_3	15.59
Fe_2O_3	01.97
MgO	02.00
CaO	00.35
Na_2O	03.36
K_2O	03.62

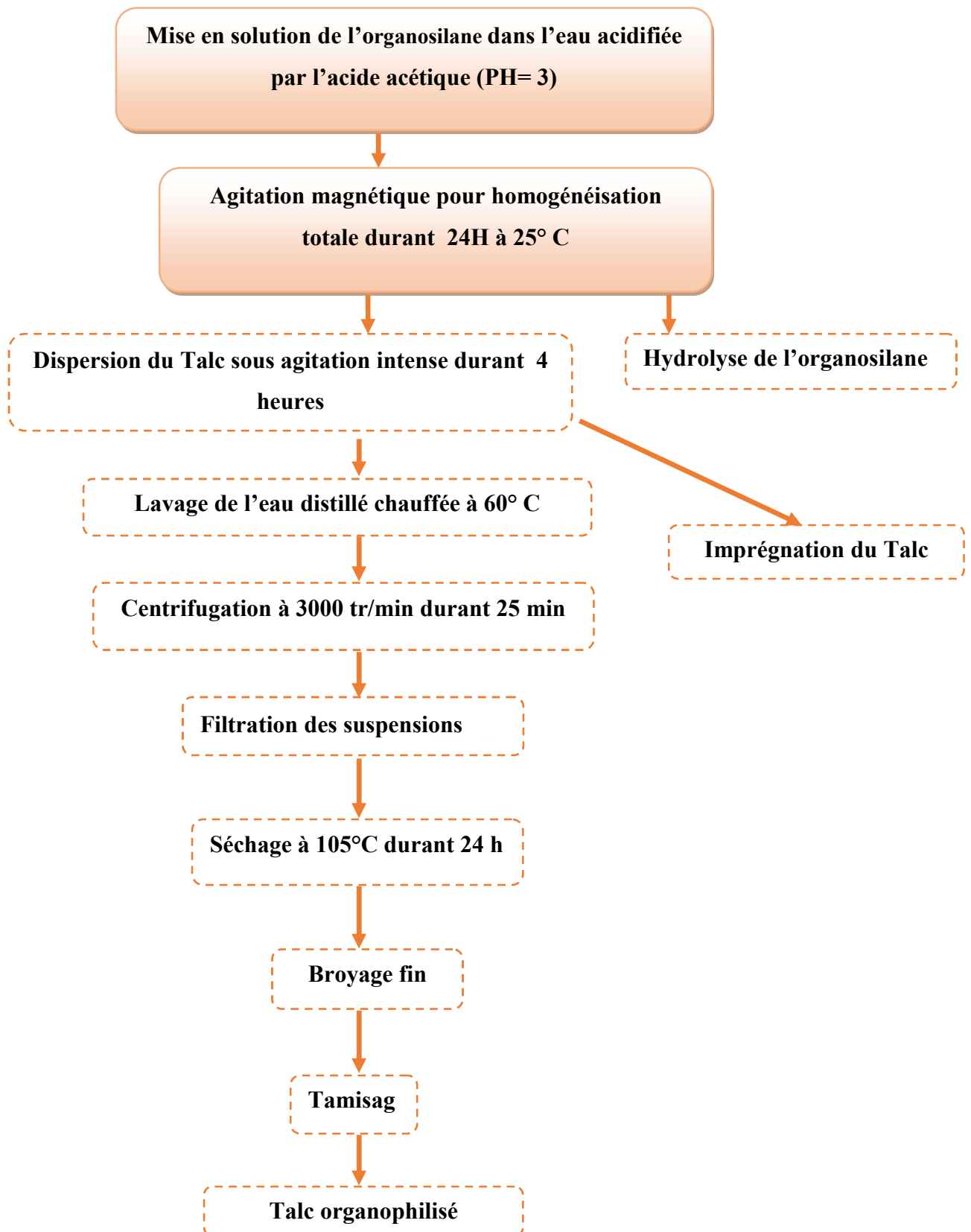


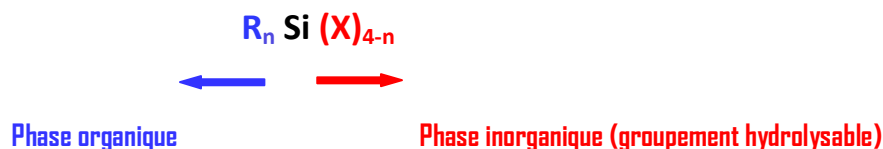
Figure III.1 : Modification chimique de la surface du talc par Silquest A-1100

III.3. Agent de couplage (silane) :

Les agents de couplage sont des molécules hybrides utilisées pour établir des ponts interfaciaux entre deux substrats qui sont habituellement mais pas exclusivement une charge minérale et un polymère organique.

Organosilanes

Les organosilanes sont des molécules à base de silicium et qui présentent deux types de fonctionnalités – inorganique et organique -. Leur formule générale est illustrée par :



Structure générale des organosilanes

R désigne un ligand organique, comme une chaîne alkyle ou une chaîne courte portant un groupement organofonctionnel, et **X** représente une fonction hydrolysable (chlore, amine, éthoxy, méthacryloxy, époxy...). Ces composés ont l'avantage de pouvoir se lier par plusieurs mécanismes. Les forces électrocinétiques peuvent permettre une attraction ou une répulsion à grande distance, tandis qu'à une échelle de distance inférieure, les silanols permettent d'établir des forces de Van Der Waals, des liaisons.

Hydrogène et covalentes. En combinant toutes ces possibilités en une seule molécule les organosilanes sont particulièrement adaptés à la modification de la surface de la silice. Les organosilanes sont produits via le procédé sol-gel pour lesquelles les groupes organiques covalents sont insérés au sein d'un réseau inorganique. Ces derniers sont obtenus à partir des réactions d'hydrolyse et de condensation.

De très nombreux paramètres interviennent sur l'efficacité du greffage citons entre autres (nature de la surface, fonctionnalité, température, temps, concentration, solvant, pH, catalyseur et le traitement thermique du solide modifié).

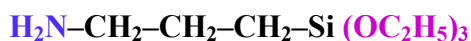
Parmi les plus pertinents on cite la fonctionnalité des organosilanes. Ce terme désigne le nombre de groupements hydrolysables présents sur la molécule. De ce fait on distingue les silanes mono, bi et trifonctionnels.

L'avantage des silanes monofonctionnels est qu'ils se greffent après hydrolyse, sous forme de monocouche et que s'ils se dimérisent en solution ne contribuent plus au greffage. Mais leur réactivité est faible et ne permet pas d'obtenir des couches denses.

Les silanes bi et trifonctionnels sont plus réactifs, mais par contre ils peuvent éventuellement se poly-condenser en solution avant le greffage. Ce qui peut générer la formation de

Multi-couches où l'accessibilité aux fonctions réactives devient limitée. Ce phénomène de polycondensation est considérablement réduit lorsque l'on travaille dans un milieu mixte eau-solvant organique.

L'organosilane utilisé dans le cadre de cette étude est l'aminopropyletriéthoxysilane noté Silquest A-1100 fourni par Witco Corporation (USA), sa formule chimique est donnée par :



Structure du Silquest A-1100

Le Silquest A-1100 est un agent de couplage très efficace pour l'ensemble des élastomères, des résines thermodurcissables et thermoplastiques renforcés par des silices. Il est également recommandé comme additif pour l'amélioration des performances des résines méthacryloxy lorsqu'elles sont utilisées comme liants de minéraux. Les caractéristiques physiques types sont regroupées dans le **Tableau III.3**.

Tableau III.3 : Les caractéristiques physiques types du Silquest A-1100 [37]

Paramètre	Unités	Valeur
Aspect	-	Liquide transparent
Densité à 25°C/25°C	-	0.95
Indice de réfraction, nD 25°C	-	1.42
Teneur en matières actives	% en poids	85
Couleur	-	Claire
Viscosité	mm ² /s	5.4
Point éclair-coupe fermée	°C	96
Point d'ébullition à 760 mm Hg	°C	220

III.4.Mélanges étudiés :

Pour la préparation des mélanges PP/EPDM/SiO₂ le taux de charge varie de 1,3 et 5%. Les différentes formulations réalisées au cours de cette étude ont été préparées dans un mélangeur interne de type : PLASTOGRAPH BRABENDER, **Figure III.2**. La température de malaxage, la vitesse de rotation des rotors et le temps de mélangeage sont 230°C, 30 tours/min et 10 minutes, respectivement.

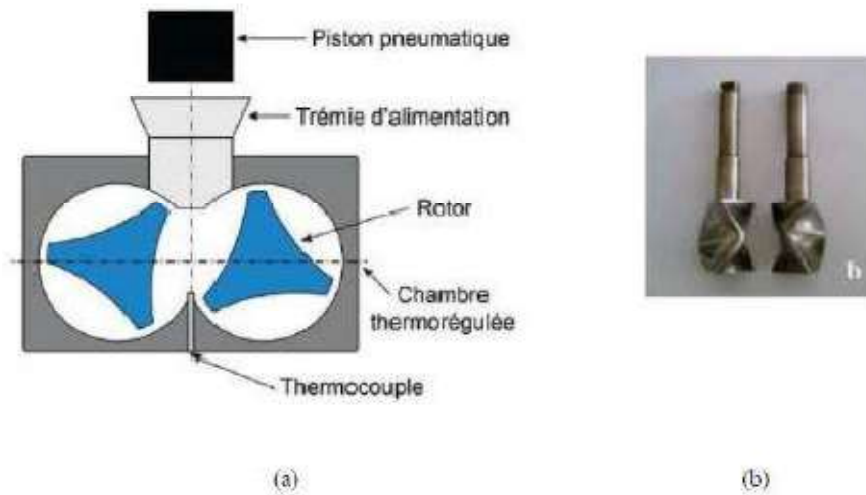


Figure III.2: Image d'un mélangeur interne : (a) Chambre de malaxage, (b) Géométrie des rotors contrarotatifs [38].

Tableau III.4 : Composition des mélanges à matrice (PP/Talc)

MELANGES	PP	Talc NTRT	Talc TRT
PP	100	0	0
PP/ 1 % Talc NTRT	99	1	0
PP/ 3 % Talc NTRT	97	3	0
PP/ 5% Talc NTRT	95	5	0
PP/ 1 % Talc TRT	99	0	1
PP/ 3 % Talc TRT	97	0	3
PP/ 5 % Talc TRT	95	0	5

NTRT: non traitée, **TRT:** traitée

Les mélanges sont retirés et refroidis à l'air libre, puis broyés dans un broyeur de type Contrôlable pour être désignés aux différentes caractérisations (mécaniques, IRTF et Morphologiques). **Figure III.3** montre l'organigramme générale d'élaboration des composites.

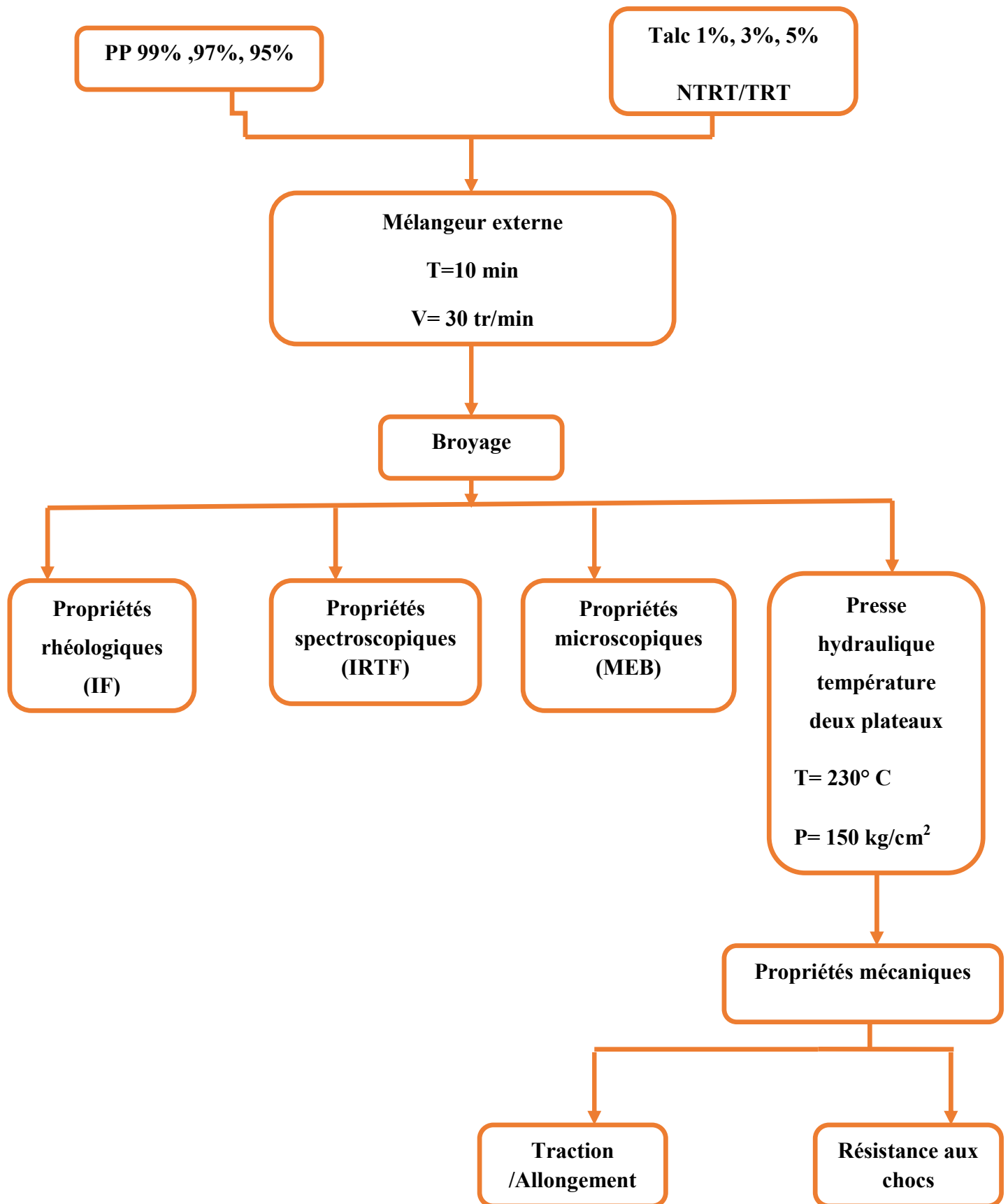


Figure III.3 : Organigramme général d'élaboration et de caractérisation des différents mélanges

III.5.Caractérisation des mélanges:

III.5.1.Propriétés spectroscopique IRTF :

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé.

L'absorption infrarouge est une technique incontournable de la caractérisation qualitative de la chimie des silices permettant de mettre en évidence les réactions possibles entre les hydroxyles superficiels et l'agent de couplage [39].

Le matériau exposé à un rayonnement infrarouge présente des bandes d'absorption dont les nombres d'ondes sont caractéristiques de la nature et de la fréquence de vibration ou de rotation des liaisons chimiques dont elles sont le siège.

L'appareil utilisé est un spectromètre IRTF « SHIMATZU » travaillant en transmission et réflexion. L'information est digitalisée (microprocesseur) est stockée avec possibilité d'enregistrement des spectres. La résolution est de 4 cm^{-1} pour un domaine d'étude de 4000 à 400 cm^{-1} . Le dépôt de l'agent de couplage sur la silice est analysé en transmission à partir des pastilles silice/KBr. La technique consiste à mélanger l'échantillon avec le bromure de potassium anhydre grade spectroscopique et les pastiller dans un moule sous une pression d'environ 6 tonnes/cm^2 . Les résultats sont obtenus en enregistrant les spectres infrarouges après 25 accumulations au minimum.

La spectroscopie IRTF a été également utilisée pour doser les polymères greffés. Dans ce cas l'analyse est basée sur l'exploitation des bandes caractéristiques des groupes carbonyles de l'anhydride maléique. Les spectres sont réalisés sur des films de polymères purs et greffés de quelques dizaines de microns d'épaisseur obtenus par compression sur une presse manuelle à 200°C et sous une pression de 180 Kg/cm^2 .

III.5.2.Propriétés mécaniques:

III.5.2.1.Essai de traction:

Le test de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé pour déterminer la capacité d'un matériau à résister aux contraintes extérieures, et à partir de quelle charge il y a risque de rupture. Cet essai consiste à soumettre un échantillon de section constante à une contrainte unidirectionnelle de vitesse constante et à mesurer l'allongement.

L'éprouvette de traction utilisée est de la forme suivante (**Figure III.4**) :

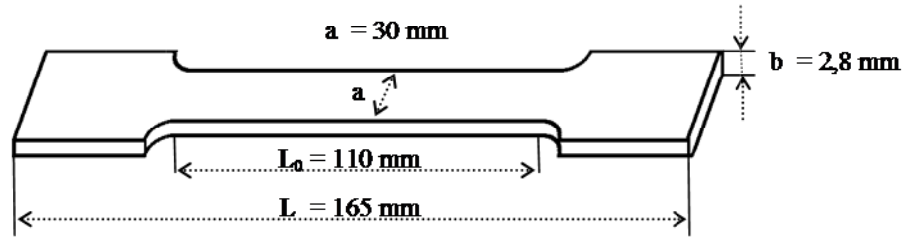


Figure III.4 : Dimensions et forme de l'éprouvette utilisée pour les essais de traction

L'éprouvette comprend une section constante S_0 et la longueur initiale de la section avant étirement est l_0 . Les extrémités de l'éprouvette ont une section supérieure à S_0 , ce qui permet de les fixer à la machine. Cette dernière est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse fixe à laquelle est fixée l'une des extrémités de l'éprouvette et une traverse mobile dont le mouvement est assuré par une commande à laquelle est fixée l'autre extrémité de l'échantillon. Une contrainte est imposée à l'éprouvette et la déformation correspondante est enregistrée, toutes deux sont calculées à partir des équations suivantes :

i. La contrainte
$$\sigma \text{ (Pa)} = \frac{F \text{ (N)}}{S_0 \text{ (m}^2\text{)}} \quad \text{(IV.1)}$$

ii. La déformation
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{(IV.2)}$$

iii. Le module d'Young
$$E \text{ (MPa)} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad \text{(IV.3)}$$

E : pente de la courbe contrainte/élongation en pascal (Pa).

F : charge maximale appliquée en Newton (N).

Δl : allongement de l'éprouvette en mètre (m).

l_0 : longueur de l'éprouvette en mètre (m).

Les propriétés mécaniques en traction ont été menées sur une machine d'essais mécaniques MTC 550. La vitesse de déplacement de la traverse mobile (vitesse de l'étirement des échantillons est de 20 mm/min). Les essais ont été effectués dans des conditions normales de température et de pression.

III.5.2.2. Essais de chocs:

Les essais aux chocs passent par le processus dissipatif d'énergie capables de retarder au maximum la cassure du polymère. Dans le cas des matériaux testés en rupture, le test à l'impact consiste à fixer horizontalement l'échantillon entaillé ou non sur un support puis envoyer une charge connue à une certaine vitesse dont l'impact se fait au niveau de l'entaille puis à mesurer l'énergie totale à la rupture.

Les essais ont été réalisés à température ambiante l'aide d'un appareil type CEAT modèle 6546 et qui consiste fondamentalement en un pendule lourd portant à son extrémité libre un marteau, un emplacement pour éprouvette, ainsi qu'un cadran indicateur de l'énergie absorbée au cours du choc.

L'éprouvette, préparée selon les spécifications de la norme ASTM D 256-73, est encastrée à l'une de ses extrémités entre deux mâchoires et percutée à l'autre extrémité

L'entaille que l'on introduit comme amorce de rupture pour concentrer les contraintes et fragiliser l'éprouvette est de 2 mm. Le choc est donné au centre de l'éprouvette par un marteau de 7 J.

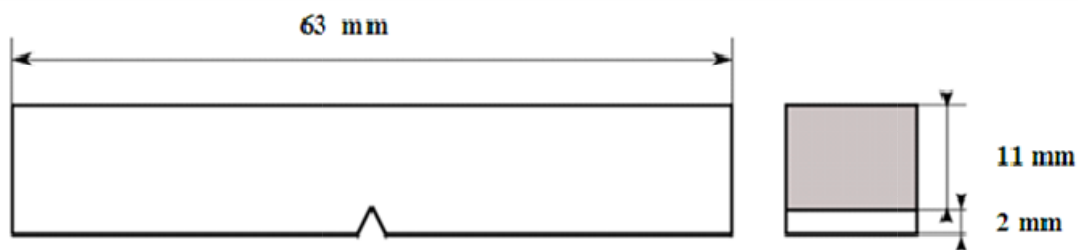


Figure III.5: Dimensions et forme de l'éprouvette utilisée pour les essais de chocs

La résilience a_N sur barreau lisse a pour valeur :

$$a_N = \frac{A_N}{b \cdot h} \quad (\text{IV.9})$$

Où A_N : l'énergie cinétique absorbée par l'éprouvette sans entaille au moment de l'impact, en joule.

B et h sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette, mesurées au centre de celle-ci, en cm.

III.6. Propriétés rhéologiques:**III.6.1. Indice de fluidité (IF) :**

L'indice de fluidité (Malt Flow Index) ou grade, renseigne sur les propriétés d'écoulement du polymère. Ce paramètre varie de façon inverse avec la viscosité ou la masse moléculaire. Il est déterminé en mesurant à une température donnée, la masse de polymère écoulé sous une

charge de 2,16 Kg, pendant 10 minutes dans un capillaire de dimensions données, voir **Figure III.6**

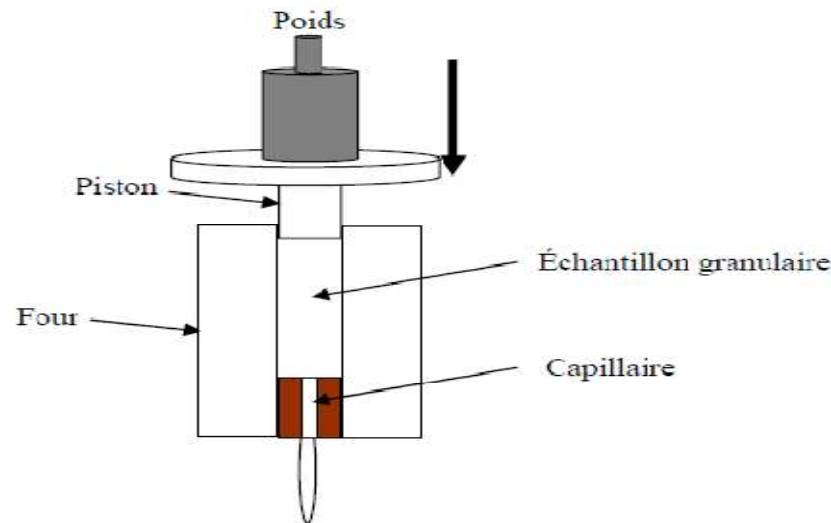


Figure III.6:Appareil de mesure de l'indice de fluidité

La formule utilisée pour le calcul de MFI est ci-après détaillée :

$$\text{MFI (g/10 minute)} = W_m \times 600/t \text{ (sec)}$$

Avec **W_m**; est le poids de l'échantillon après extrusion de 30 secondes (trois mesures). Des les résultats sont rapportés en grammes d'extrudât par 10 minutes ou de décagrammes par minute. Par exemple le polypropylène exige une température de 230°C et une charge de 2,16 kilogrammes.

III 7.1.Propriétés morphologiques :

La microscopie électronique à balayage doit pouvoir nous permettre d'obtenir une Visualisation des particules de silice dans les nanocomposites et ainsi de connaître leurs états de dispersion. En utilisant différents niveaux de grossissements nous pouvons recueillir des informations importantes concernant la nanostructure.

Un microscope électronique à balayage est composé d'un canon à électrons (en général un filament de tungstène) muni d'un convergent qui fournit un faisceau monochromatique. Parallèle à l'axe optique. Ce faisceau est ensuite condensé sur l'échantillon, puis projeté sur un écran fluorescent. Lorsque le faisceau traverse l'échantillon, une partie de son énergie est absorbée par le matériau, et cette partie est directement proportionnelle à la densité atomique du matériau. La caractérisation morphologique des échantillons par microscopie électronique à balayage est réalisée sur les facettes de fracture obtenue à basse température, en utilisant l'azote liquide dans l'objectif de voir la dispersion de la charge et de l'élastomère dans les

Matrices polypropylène et polyéthylène sur un microscope électronique marque **QUANTA 200**.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV. Résultats et discussions:

IV.1. Infra rouge à transformer de fourrier:

IV.1.1 Spectre du Polypropylène vierge:

La **figure IV.1** illustre le spectre IRTF du polypropylène vierge, les bandes caractéristiques suivantes ont été observées :

L'apparition des bandes caractéristiques attribuées aux vibrations d'élongations du groupement -CH de $-CH_2$ dans la zone entre $2820-3290\text{ cm}^{-1}$. L'apparition des bandes à l'environ de $1370-1480\text{ cm}^{-1}$ attribuée à la déformation dans le plan de -CH des groupements $-CH_2$ et $-CH_3$ [40].

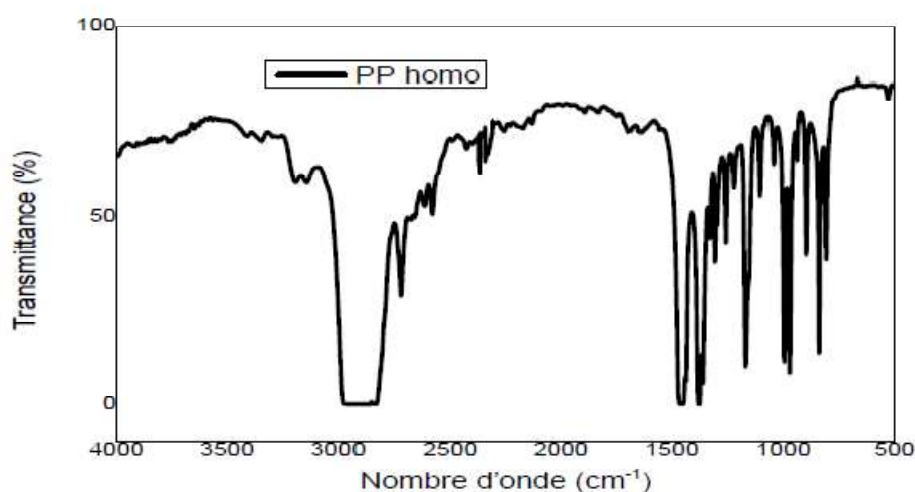


Figure IV.1 : Spectre IRTF de polypropylène vierge

IV.1.2. Spectre du talc:

Le spectre enregistré se caractérise par un massif s'étendant entre 3700 et 3200 cm^{-1} . Ce massif est constitué de deux bandes centrées vers 3636 et 3416 cm^{-1} . Ces deux bandes correspondent respectivement aux vibrations de valence des **O-H** de constitution et des **O-H** de l'eau adsorbée physiquement. La bande de déformation du groupement hydroxyle de l'eau se situe également vers 1641 cm^{-1} . La bande de vibration de valence **Al-OH** à 3636 cm^{-1} et celle de déformation à 918.7 cm^{-1} indiquent que cette argile est dioctaédrique.

La structure hôte du silicate est identifiée par les bandes d'absorption s'étendant entre 1200 et 1000 cm^{-1} . La bande centrée vers 1089 cm^{-1} est caractéristique de la vibration de valence du groupement **Si-O** du réseau argileux, tandis que les bandes de déformation apparaissent

respectivement vers 690 cm^{-1} pour le groupement siloxane **Si-O-Si** et à 523 cm^{-1} pour le groupement **Al-O-Si**.

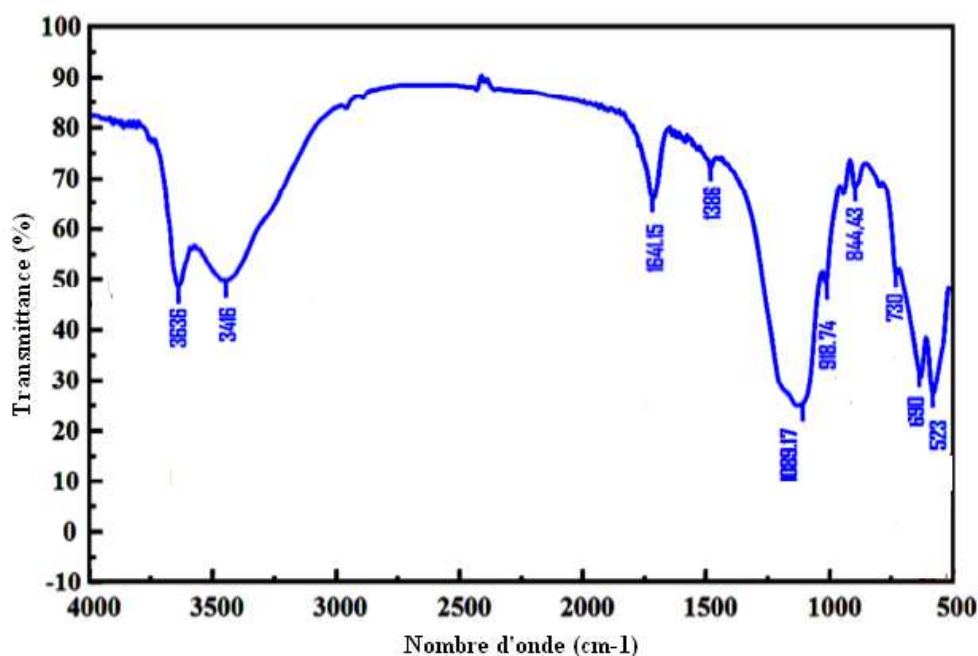


Figure IV.2 : Spectre IRTF du talc vierge

IV.1.3. Spectre IRTF du talc organophylisé par le Silquest A-1100:

La **Figure IV.3** représente les spectres infrarouges du talc modifié avec le Silquest A-1100 en comparaison avec celui de référence, l'agent de couplage pur. Le spectre IV.3 (b) montre deux bandes intenses à 2980 et 2888 cm^{-1} . Celles-ci pourraient être attribuées aux vibrations d'élongation des liaisons **C-H** du groupe **-CH₂-** du segment aminopropyl du Silquest A-1100. L'épaule à 930 cm^{-1} est caractéristique de la déformation de la liaison **Si-O** dans le groupe **Si-OH**. Cela peut signifier que la réaction d'hydrolyse de l'aminosilane est complète mais que la condensation en réseau polysiloxane n'est pas tout à fait totale.

La bande située à 3382 cm^{-1} correspondant à l'ion ammonium indique la formation d'un complexe de ponts hydrogènes type **H₂N⁺-H-O-Si-**. Ce qui suppose que l'aminosilane se déposerait essentiellement sous forme cyclisée. L'épaule à 1630 cm^{-1} est probablement

attribué à la présence d'un sel d'amine type $\text{NH}_3^+\text{HCO}_3^-$, l'existence d'une telle espèce résulte vraisemblablement de l'absorption du dioxyde de carbone de l'air par l'amine.

Chabert et al. [41] ainsi que Doufnoune et al. [42] montrent par une étude spectroscopique que les amines primaires peuvent former un sel de bicarbonate au contact de l'humidité et du dioxyde de carbone.

La bande à 1580 cm^{-1} est plutôt attribuée à l'absorption de l'ion NH_3^+ impliqué dans un pont hydrogène bien évidemment avec les groupes silanols. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux de Doufnoune et al [43] qui détermine une structure semblable lors du dépôt du Silquest A-1100 sur le carbonate de calcium et le gel de silice.

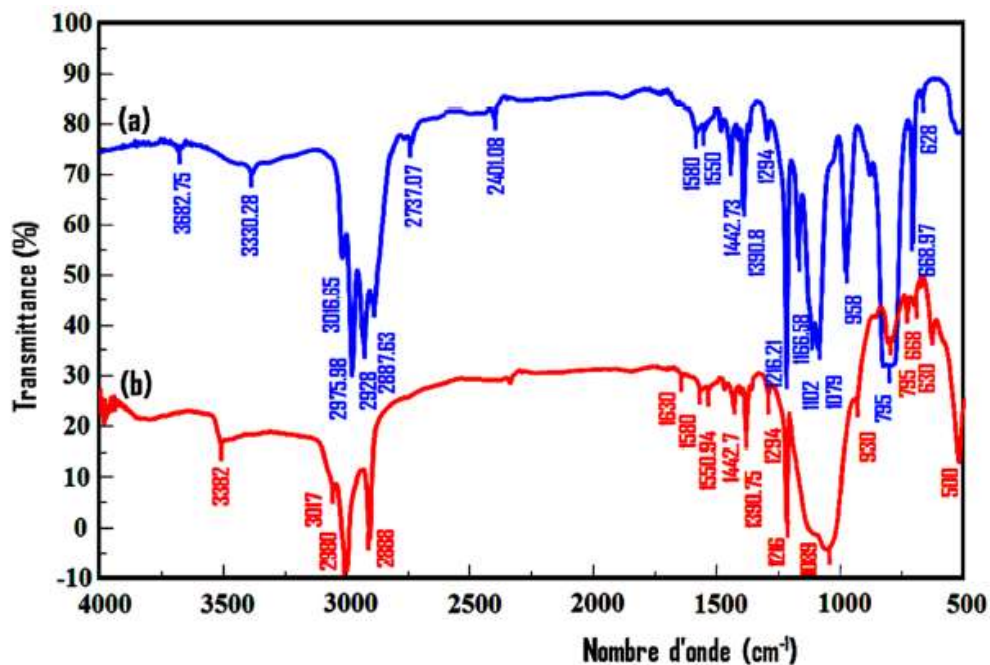


Figure IV.3: Spectres infrarouges du (a) Silquest A-1100 et de la (b) talc avec le Silquest A-1100 (talc-A1100)

IV.3. Étude des propriétés mécaniques:

IV.3.1. Étude des propriétés en traction:

Parmi les différentes contraintes mécaniques agissant isolément ou en association auxquelles un matériau peut être soumis, l'attention porte souvent sur la traction, du fait que cet essai est

applicable à tous les types de matériaux souples ou rigides, vient en second lieu l'essai de cisaillement.

L'éprouvette de traction parallélépipédique ou cylindrique est un solide d'égale résistance entre têtes, toutes les sections droites étant également sollicitées.

Il n'en est pas de même lorsqu'une éprouvette parallélépipédique est sollicitée en flexion entre appuis, car dans ce cas, la section médiane supportant la contrainte la plus forte est normalement celle où se produira la rupture, alors qu'il serait souhaitable qu'elle ait lieu dans la section la moins résistante, parfois loin du plan médian. D'autre part, le diagramme de traction est probablement celui dont l'interprétation est la plus simple et la plus caractéristique. Elle l'est particulièrement dans l'état rigide (cas des composites) puisque la courbe contrainte-déformation est une droite, l'aire du triangle représente l'énergie de rupture statique. D'ailleurs, il en est de même en flexion.

Cependant, même dans le domaine plastique, le diagramme de traction peut sembler fondamental, car il traduit mieux que dans le domaine rigide les différentes propriétés du matériau: élasticité, viscoélasticité, plasticité, mais dans les conditions de l'expérience. Enfin, les grandeurs numériques obtenues sont d'un ordre qui traduit le comportement spécifique aux composites. Toutes ces raisons font que l'essai de traction est le plus adéquat dans la pratique. Les propriétés ultimes en traction exprimées par la contrainte et la déformation à la rupture et au seuil d'écoulement ainsi que le module de Young ont été relevées pour approcher au mieux l'effet de l'incorporation des particules de taille nanoscopiques sur les propriétés mécaniques globales du mélange renforcé en premier lieu, et en second lieu mettre l'accent sur l'influence de l'organophilisation de la charge. Il est bien établi que le comportement mécanique aux grandes déformations des polymères renforcés est assez complexe vu les nombreux paramètres intervenant dans les mécanismes variés.

Au-delà du domaine élastique, se développent dans les polymères purs différents mécanismes de déformation, non réversibles instantanément : une partie de la réponse mesurée est de nature élastique, le reste est défini comme plastique.

De manière générale, l'introduction de particules rigides dans la matrice entraîne une hausse de la valeur de la contrainte associée au seuil conventionnel d'écoulement. Le transfert de charges entre polymère et charges inorganiques conduit à une augmentation de la contrainte au passage

dans le régime de déformation plastique. Ce renforcement de contraintes apparaît même aux faibles taux de particules introduites

Comme Jancar et al [44] le souligne, lorsque le renfort présente une anisotropie géométrique, une partie du chargement externe peut être transmise via des frictions interfaciales entre renfort et matrice. Ce mode de transfert s'oppose à la réduction effective de section de polymère supportant la déformation, et ce d'autant plus que la qualité de l'adhésion est bonne. D'autre part, il a été suggéré une possible anisotropie cristalline liée à la présence du talc.

Ces deux paramètres pourraient participer à un important mécanisme de transfert. Si le transfert s'opère par cisaillement comme dans le cas des composites à fibres courtes, alors l'orientation des plaquettes devient significative : le transfert sera optimal le long de la plaquette, dans les autres directions il sera nettement plus limité.

Les **figures IV.4 et IV.5** montrent l'évolution du module de Young des différents systèmes étudiés.

Globalement, il ressort des résultats que l'incorporation des particules de talc dans le mélange conduit à une plus grande rigidité élastique du matériau. Ce résultat met en évidence un mécanisme de distribution de la contrainte appliquée (transfert de charge) entre les différents constituants du matériau.

L'effet de renforcement semble d'autant plus marqué avec le mélange formulé à partir du talc traité avec le Silquest A-1100. Cette grande rigidité est attribuée à l'existence d'une meilleure affinité entre charge/agent de couplage et matrice polymère/agent de couplage. **Tableau IV.1.** Rassemble les valeurs du module de Young des différents composites.

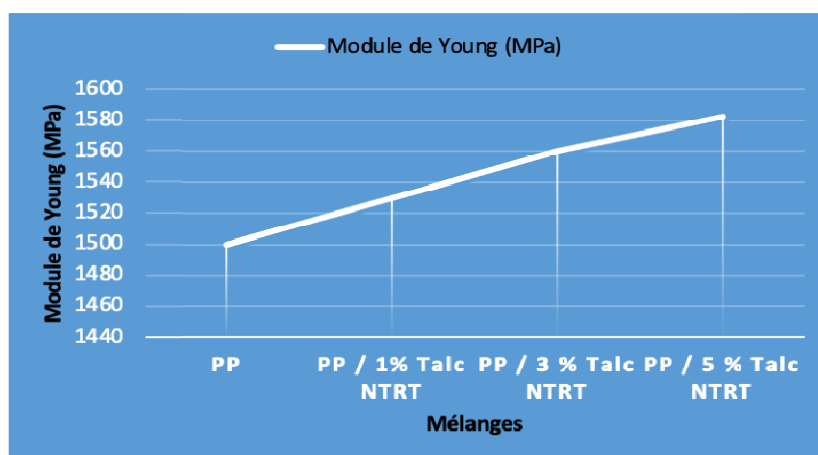
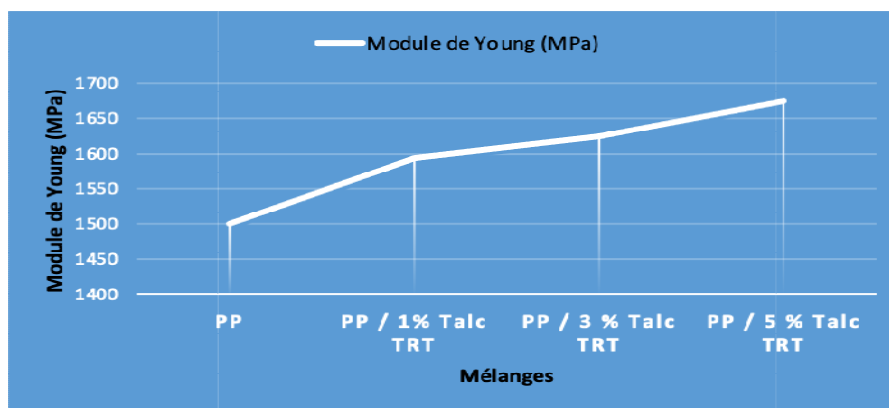


Figure IV.4:Variation du module de Young des composites à charge brute**Figure IV.5:**Variation du module de Young des composites à charge modifiée**Tableau IV.1:**Valeurs du module de Young des différents composites

Mélanges	Module de Young (MPa)
PP	1500
PP / 1% Talc NTRT	1530
PP / 3 % Talc NTRT	1560
PP / 5 % Talc NTRT	1583
PP / 1% Talc TRT	1594
PP / 3 % Talc TRT	1625
PP / 5 % Talc TRT	1675

La variation de la contrainte au seuil de l'écoulement et de l'allongement à la rupture est représentée sur les figures (IV.6 et IV.7, IV.8 et IV.9) qui montrent les effets combinés du taux de charge et du traitement. Il semble que les propriétés ultimes et à la rupture dépendent, tout autant de l'état d'interface, c'est-à-dire du degré d'interaction entre la charge et la matrice.

L'ajout de talc à différents taux fait augmenter la contrainte au seuil d'écoulement surtout à 5%. Cette augmentation est plus marquée avec le talc organophylisé qui assure une continuité entre les phases.

En effet, la chute la plus spectaculaire de la déformation concerne les formulations à charge traitée. De plus, il est remarqué une réduction modérée de la déformation au seuil d'écoulement de l'ensemble des mélanges notamment aux faibles taux de renforts. Néanmoins, avec des taux de renfort croissant, une forte chute de la déformation à la rupture apparaît. C'est ce qu'on peut associer à une **transition ductile-fragile** dans le comportement du matériau. Ces résultats sont en

accord avec les résultats trouvés par Schlickmann et al [45]. Les Tableaux (IV.2 et IV.3) rassemblent les valeurs de la contrainte au seuil d'écoulement et de l'allongement des différents composites étudiés.

Tableau IV.2: Valeurs de la Contrainte au seuil d'écoulement des différents composites

Mélanges	Contrainte au seuil d'écoulement σ_{\max} (MPa)
PP	3.6
PP / 1% Talc NTRT	3.9
PP / 3 % Talc NTRT	4.2
PP / 5 % Talc NTRT	4.9
PP / 1% talc TRT	4.3
PP / 3 % talc TRT	4.8
PP / 5 % talc TRT	5.7

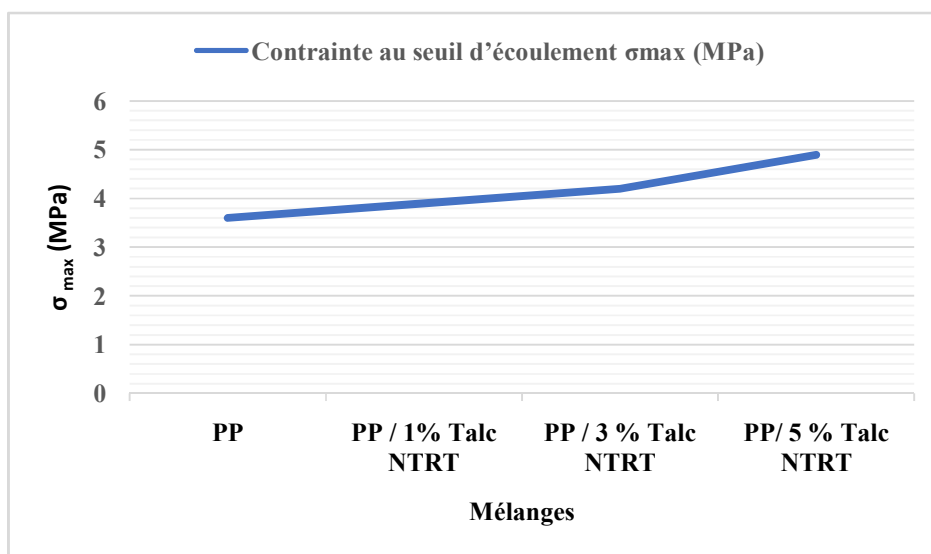


Figure IV.6: Variation de la Contrainte au seuil d'écoulement des composites à charge brute

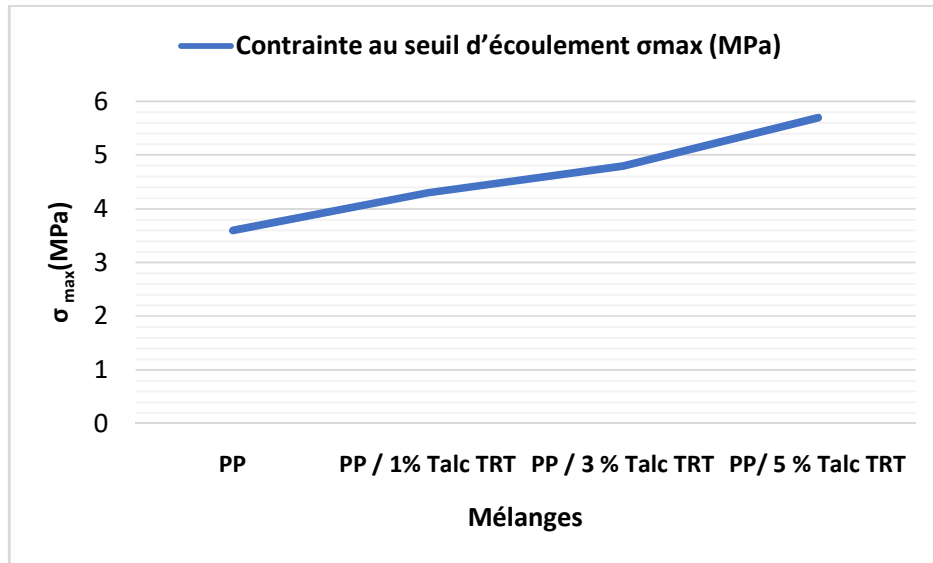


Figure IV.7: Variation du Contrainte au seuil d'écoulement des composites à charge modifiée

Tableau IV.3: Valeurs du l'allongement à la rupture des différents composites

Mélanges	Allongement a la rupteur ϵ_r (%)
PP	49
PP / 1% Talc NTRT	48
PP / 3 % Talc NTRT	47
PP / 5 % Talc NTRT	45
PP / 1% talc TRT	46
PP/ 3 % talc TRT	42
PP / 5 % talc TRT	38

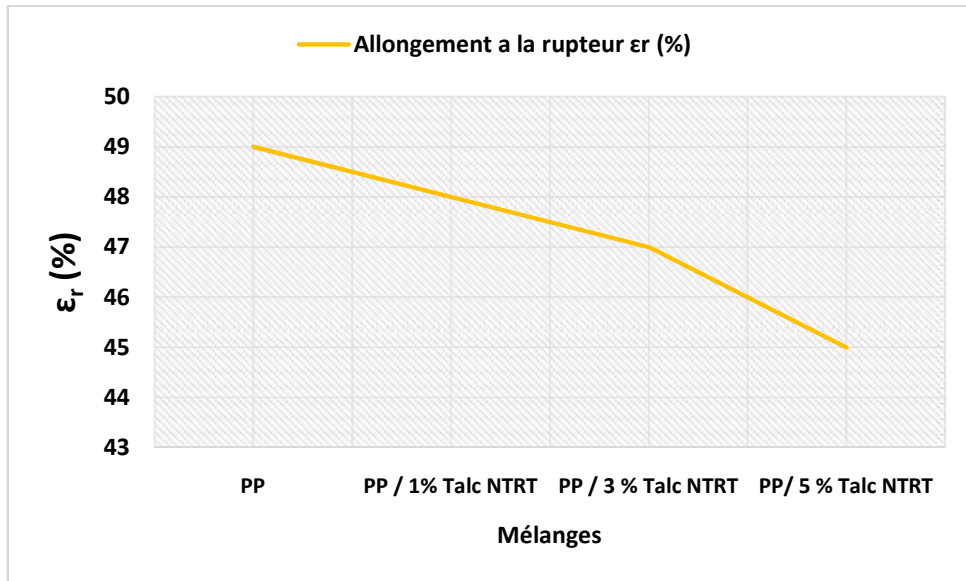


Figure IV.8: Variation du l'allongement à la rupture des composites à charge brute

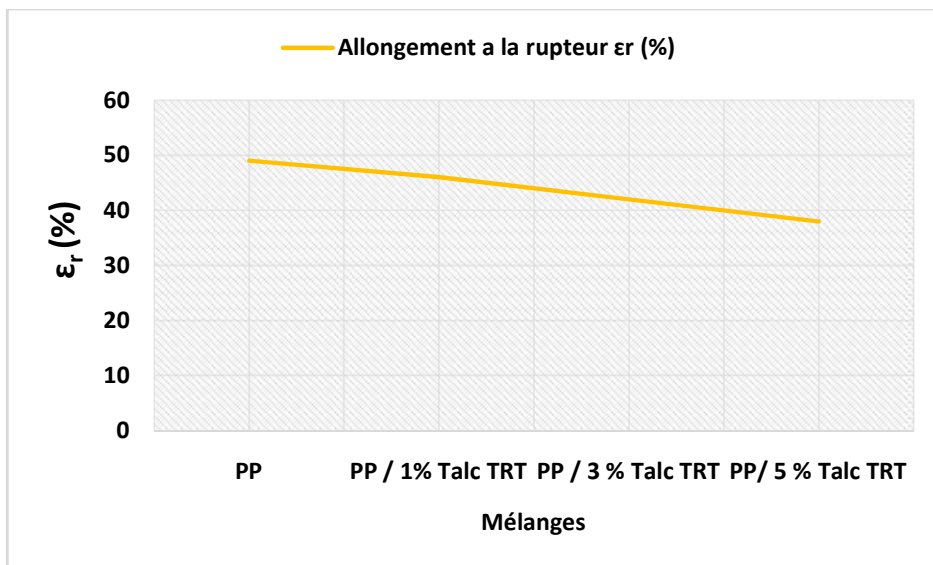


Figure IV.9: Variation du l'allongement à la rupture des composites à charge modifiée

IV.3.2. Résistance aux chocs :

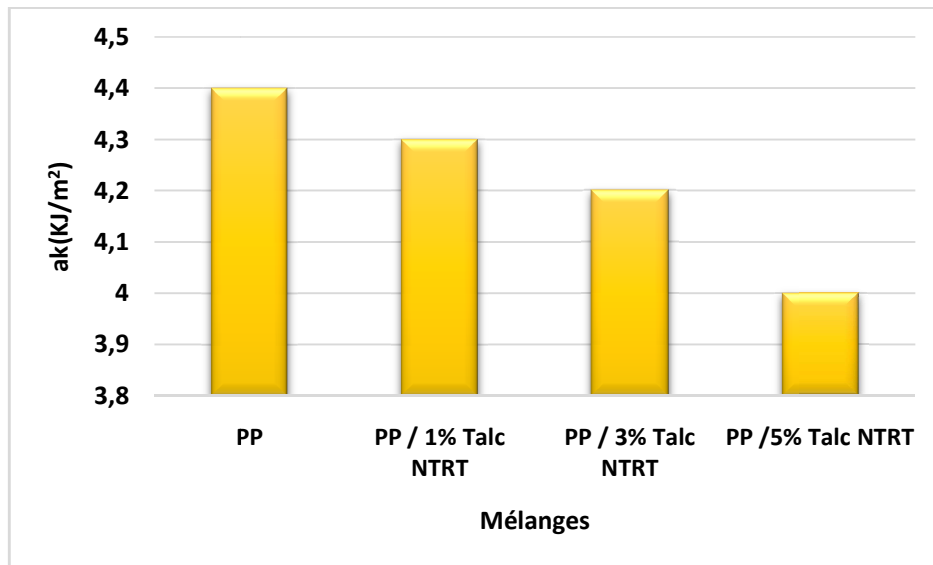
La présence de particules de Talc affecte notablement les propriétés d'impact du Polypropylène, les valeurs de l'énergie d'impact sont inférieures par rapport à celle de la matrice vierge (sans charge). Pour les teneurs massiques supérieures, on observe une diminution de la résistance d'impact.

Il peut être envisagé que le partage de l'énergie absorbée entre les différentes phases soit responsable du renforcement observé étant donné la distance interparticulaire qui reste plus au moins important étant que le taux de charge est faible[46].

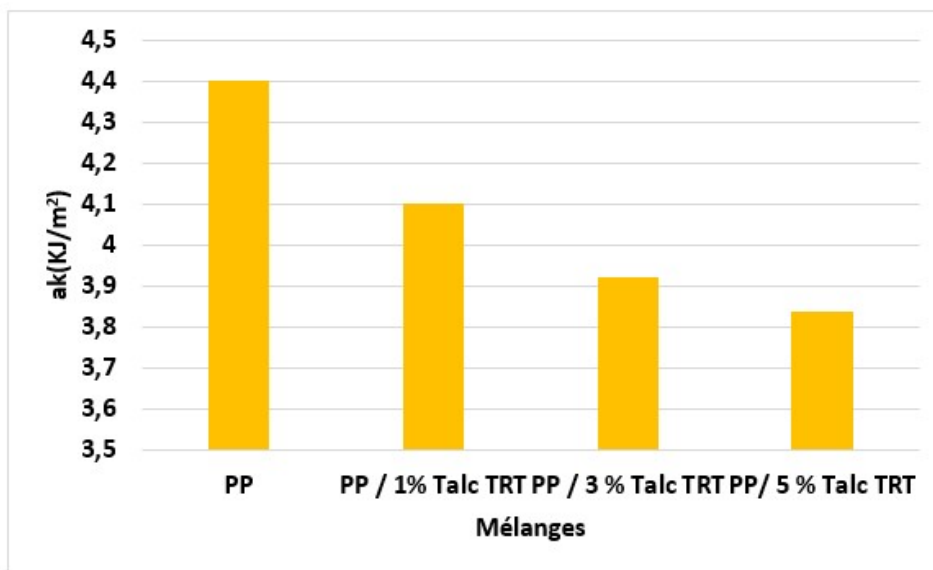
La forte fragilisation des nano-composites élaborés à partir de particules de talc traitée par le Silquest A-1100 est néanmoins attribuée à une forte rigidification de la zone interfaciale. Des valeurs très moyennes de la résistance aux chocs sont obtenues avec la charge brute (Figures IV.10 et IV.11). Cette régression pourrait être due à un phénomène de mouillabilité ou de compatibilité entre deux matériaux complètement dissemblables. Cependant, une diminution accentuée de la résistance à l'impact est observée avec la modification chimique du talc par l'organo silane dans le PP. Cette chute de la résistance aux chocs est enregistrée pour les nanocomposites formulés à partir des taux de talc les plus élevés d'une part, et d'autre part due à la forte fragilisation des nano composites élaborés à partir du talc traité par le Silquest A-1100 attribuée à une forte rigidification de la zone interfaciale, dont les particules enrobées sont isolées de matrice. Le **Tableau IV.4** rassemble les valeurs calculées à partir des équations mentionnées dans le chapitre III. Bourmel[47] dans son étude sur le mélange (PP/PEBD) a enregistré une grande diminution de la résistance aux chocs suite à l'ajout de micro- CaCO_3 résultant d'absence d'interaction particule-charge et de la non disponibilité de beaucoup de sites sur la matrice suite à la taille des micro-charge, mêmes résultats sont trouvés par Boufassa[48] dans son étude sur le mélange (PP/PEHD/micro- CaCO_3).

Tableau IV.4: Valeurs de la résistance aux chocs des différents composites

Mélanges	Résistance aux chocs a_k (KJ/m ²)
PP	4.4
PP / 1% Talc NTRT	4.3
PP / 3 % Talc NTRT	4.2
PP / 5 % Talc NTRT	4.0
PP / 1% Talc TRT	4.1
PP / 3 % Talc TRT	3.92
PP / 5 % Talc TRT	3.84



Figures IV.10: Variation de la résistance aux chocs des composites à charge brute



Figures IV.11: Variation de la résistance aux chocs des composites à charge modifiée

IV.4. Étude des propriétés rhéologiques :

IV.4.1. Indice de fluidité (IF) :

L'indice de fluidité est une mesure de l'indice de fluidité des polymères à l'état fondu. Un MFI élevé (viscosité élevée) indiquant que les deux homopolymères sont non-miscibles avec l'un à l'autre a été corrélée avec la présence de dislocation réduite et l'adhérence faible.

Les Figures (IV.12, IV.13) montrent les représentations graphiques de la variation de l'indice de fluidité en fonction des différents composites et le Tableau (IV.5) récapitulent les valeurs calculées.

Le polypropylène présente une valeur de la résistance aux chocs qui vaut 2 g/10min présente. L'introduction du talc brute diminue la résistance aux chocs surtout aux taux de charge élevé (5%), cette diminution est plus marquée avec le talc modifier par le Silquest A-1100 ce résultat est due à une affinité entre le talc modifié est le polypropylène qui diminue la fluidité et par conséquent augmente la viscosité. Ceci va avec la littérature, ainsi dire que la formation et la stabilisation de la phase dispersée dans le polypropylène est le résultat d'un équilibre des forces rhéologiques et des forces interfaciales[49].

Tableau IV.5: Valeurs de l'indice de fluidité des différents composites.

Mélanges	IF (g/10 min)
PP	2
PP / 1% Talc NTRT	1.95
PP / 3 % Talc NTRT	1.93
PP / 5 % Talc NTRT	1.89
PP / 1% Talc TRT	1.96
PP / 3 % Talc TRT	1.98
PP / 5 % Talc TRT	1.78

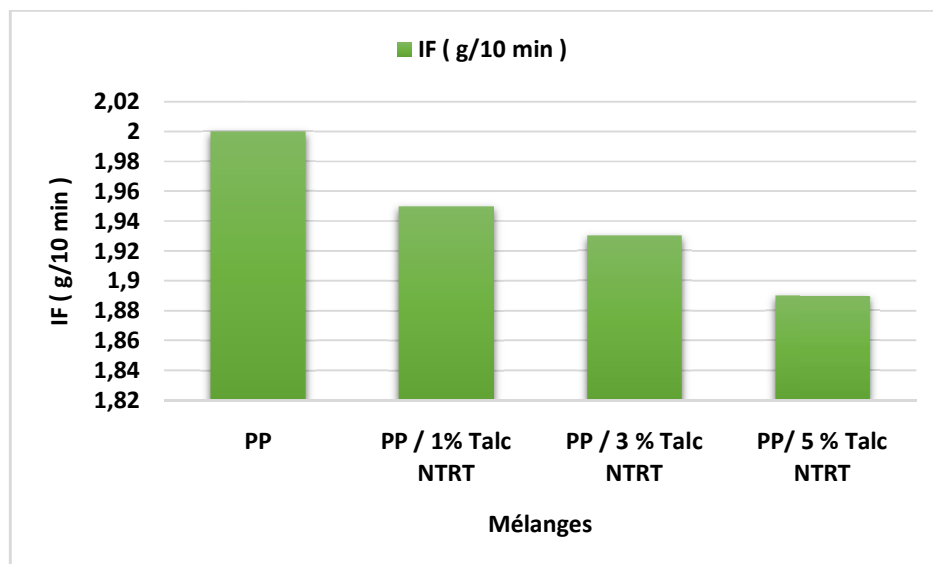


Figure IV.12: Variation de l'indice de fluidité des composite (PP/talc) brute

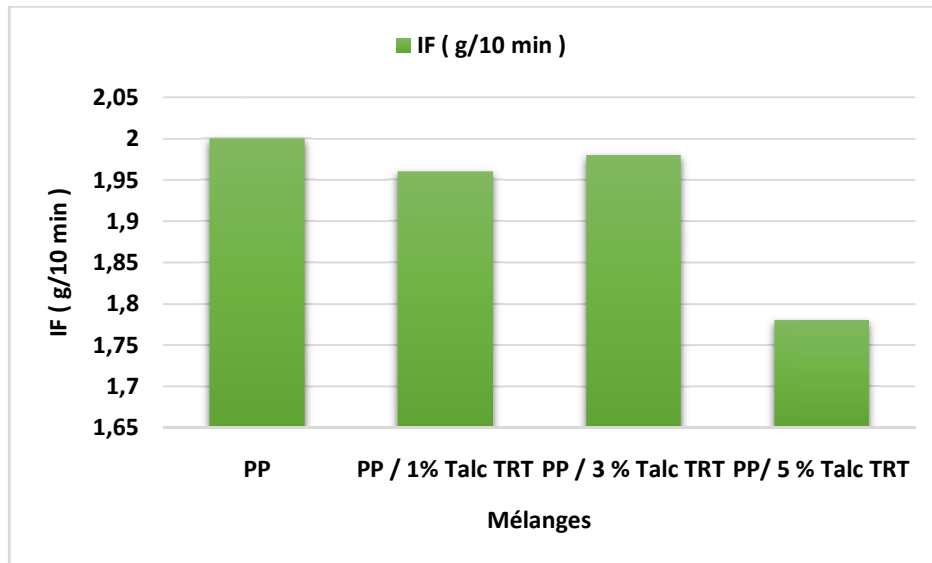


Figure IV.13: Variation de l'indice de fluidité des composite (PP/talc modifié)

IV.5. Étude des propriétés morphologiques:

Les morphologies possibles pour les mélanges de polymères sont très nombreuses, leur description consiste en une définition de la distribution spatiale des constituants, de la distribution des tailles et facteurs de forme (longueur/épaisseur), et de la nature des interfaces. Dans le cas des polymères incompatibles, le mélangeage entraîne en général la formation d'une morphologie à deux phases, qui va gouverner les propriétés finales du matériau [50].

Les principaux effets de la modification de l'interface sur la morphologie d'un mélange non miscible sont la réduction de la taille des particules ainsi que leurs distributions [51]. Cette réduction de la taille des particules est liée aux deux phénomènes : diminution de la tension interfaciale et réduction du phénomène de coalescence. En effet, Willis et al. [52] ont montré que si les interactions à l'interface sont suffisamment fortes, la taille des particules peut être indépendante de la composition.

La **Figure IV.14** présente la morphologie du PP vierge, le cliché montre un faciès de rupture rigide, ceci est due à la nature de ce polymère.

Pour les systèmes à charge brute (**Figure IV.15**), la rupture cryogénique montre un faciès de rupture fragile et une dispersion non uniforme de particules de talc, ceci est due à la tension interfaciale élevée de la charge car les particules talc montrent une énergie superficielle

importante ce qui favorise le regroupement et l'agglomération des particules et par conséquent un matériau fragile.

La **Figure IV.16** montre la morphologie des composites à charge modifiée, l'observation par MEB montre un faciès de rupture rigide et bonne dispersion de la charge dans la matrice par rapport aux composites à charge brute. Le traitement a fait diminuer la tension interfaciale du talc, ce qui lui a permis d'établir des liaisons avec le polymère PP. L'ajout du talc entraîne principalement l'augmentation de la taille et du nombre de nodules. Il est à préciser qu'une meilleure dispersion est obtenue avec la talc modifiée en surface. Bonse et al [53] ont étudié l'effet des micro et nano- CaCO_3 sur le comportement morphologique du composite PA6/ CaCO_3 , cette étude a dévoilé à partir des micrographies MEB des nanocomposites avec des amas de formes sphériques régulières tandis que les micrographies des composites élaborés avec les micro- CaCO_3 ont montrés des agglomérats de formes aiguilles et flocons et d'autres formes dans certaines conditions. Vanmarck et al [54] ont étudié l'effet des nano charge CaCO_3 sur le comportement (PEHD/PP) compatibilisé par PP-g-MAH, l'introduction de ce dernier a amélioré considérablement la morphologie par une dispersion fine et efficace.

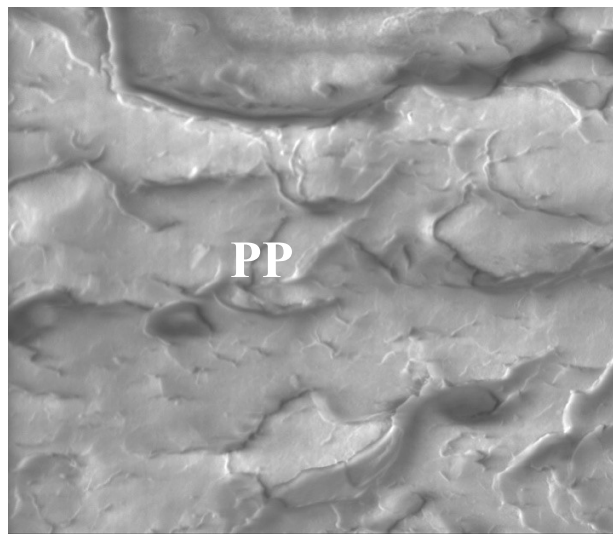


Figure IV.14: Morphologie de polypropylène (PP)

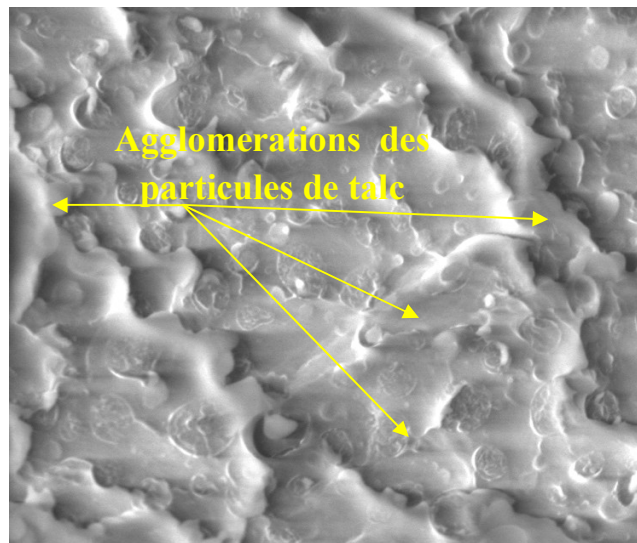


Figure IV.15: Morphologie du polypropylène/ 5% talc brute

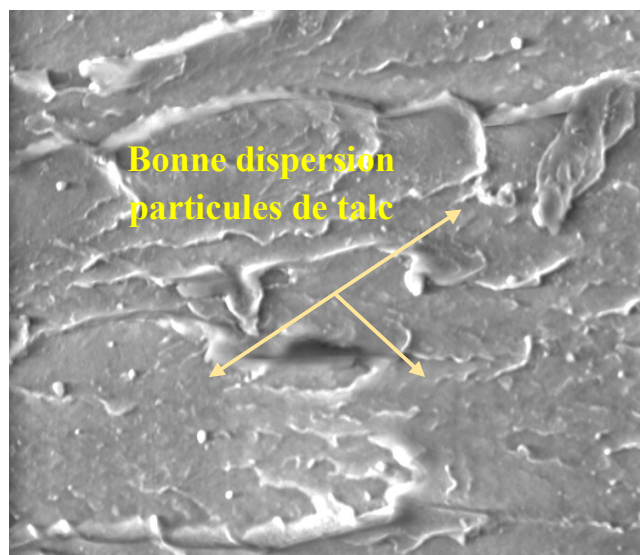


Figure IV.16: Morphologie du polypropylène/ 5% talc modifié

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales et perspectives

Les travaux développés dans le cadre de ce travail de Master, portent sur l'amélioration et la compréhension des propriétés mécaniques, morphologiques rhéologiques d'une nouvelle classe de matériaux nanocomposites à savoir Polypropylène noté PP renforcé par une charge minérale qui est le talc traité et non traité par un organosilane (aminopropyletriéthoxysilane) noté Silquest A-1100. Ces matériaux sont trop recherchés en particulier dans le secteur d'automobile qui est en plein développement.

Pour cela, nous avons choisi un polymère classique à savoir le polypropylène car il possède des propriétés très intéressantes. De plus, on a pensé à renforcer ce polymère par des nano charge car les nanocomposites constituent actuellement une voie d'avenir pour l'amélioration des performances des matériaux.

Cependant, l'expérience acquise sur les nanocomposites montre que le gain de rigidité produit par l'incorporation d'une phase rigide de taille nanométrique est contrebalancé par l'apparition de concentrations de contraintes aux interfaces qui provoquent une diminution de la résistance à la propagation de fissures dans le matériau, pour ce ci on a choisi de traiter ces nano charge par aminopropyletriéthoxysilane par ce qu'il a comme objectif de diminuer la tension interfaciale et par conséquent assurer une meilleure dispersion. Notre objectif dans ce travail était de contribuer à évaluer que peuvent apporter l'incorporation de particule de talc traité et non traité dans le polypropylène.

Le premier volet de ce travail a porté sur une étude bibliographique sur les polymères plus précisément le polypropylène en montrant leur caractéristiques et propriétés.

Le deuxième volet de ce travail a été précisément consacré à la charge minérale qui était du talc car c'est une charge de famille de poly silicates qui donnent un bon renforcement sur les polyoléfines traitée et non traitée.

L'étude de la structure par IRTF a montré les groupements caractéristiques du PP à savoir C=C, C-H, CH₃. La caractérisation de la charge a permis de mettre en évidence les propriétés du traitement de surface appliqué sur le talc par l'organosilane ont conduit à des structures complexes en surface des nanoparticules. Les résultats obtenus par IRTF montrent la formation des structures polymérisées et compactes à la surface du talc.

Les résultats mécaniques en traction et la résistance aux chocs ont été étudiés. Il ressort des résultats que les propriétés obtenues sont très sensibles à l'état de dispersion du talc au sein du système mais

Conclusions générales et perspectives

également du potentiel d'interactions développées conjointement entre la phase minérale et la phase organique.

L'étude du comportement au seuil d'écoulement et à la rupture a permis de dégager d'une part, l'influence de l'incorporation du talc sur les propriétés du polypropylène et d'autre part, de mettre en évidence le rôle du traitement sur les propriétés de la région interfaciale.

L'étude des propriétés rhéologiques par le biais de la mesure de l'indice de fluidité, a montré une diminution de la fluidité de PP suite à l'ajout du talc en particulier le modifié, cette diminution conduit à une augmentation de la viscosité.

En dernier, l'étude des propriétés microscopiques a mis en évidence la complexité de ces composites pour lesquels la morphologie est fortement affectée par un grand nombre de paramètres.

Ce travail, qui n'est une fin en soi, peut s'inscrire dans une étude plus globale pour laquelle quelques perspectives de recherche peuvent être proposées.

Comme travaux futurs, il serait intéressant d'utiliser d'autres agents de traitement de la charge (par des zirconates ou par exemple) et d'utiliser des agents compatibilisants pour améliorer et renforcer l'interface.

References Bibliographies

- [1] GHADAMI A., KARIMI H., «Synthesis and Characterization of Polyamide-66/Calcium Carbonate Composites». Polymer, 2015, 49, 63-78.
- [2] MOHSENZADEH R., and NEZHAD K., «Experimental studies on the durability of PA6-PP-CaCO₃ nanocomposite gears ». Journal of Science and Technology, 2016, 95, 147-157.
- [3] ROMDHANE, P. H. (s.d.). Polymères et matériaux. Cours pour les étudiants de master en chimie. Faculté des Sciences de Tunis. 1-3 ..2016
- [4] Mdm, « qu'est-ce que le polypropylène ? »: " https://www.mdm.fr/fr/qu-est-ce-polypropylene_16.html"
- [5] DUVAL C. ,«Techniques de l'ingénieur. Récupéré sur Préparation Polypropylènes (PP): <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/matieres-thermoplastiques-monographies-42147210/polypropylenes-pp-am3320/preparation-am3320niv10001.html>
- [6] WEISS, P. . La chimie des polymères. Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, pp. 5-8.2010.
- [7] MACROGALLERIA T., “polypropylene”: “<https://www.pslc.ws/french/pp.htm>”
- [8] DUVAL C., «Préparation Polypropylènes ». 17, 2004.
- [9] Maurice Reyne, Hermes, Traité des nouvelles technologies, série matériaux, les plastiques, 1990, page 21 : « <http://www.polymere.wikibis.com/copolymere.php#haut> »
- [10] Le Polypropylène Compounds. (s.d.). Récupéré sur totalenergies: <https://carling.totalenergies.fr/qui-sommes-nous/nos-unites/le-polypropylene-compounds>
- [11] Groupe PolyAlto. (2019). Récupéré sur Les avantages et les applications du polypropylène: <https://blogue.polyalto.com/les-avantages-et-les-applications-du-polypropyl%C3%A8ne>
- [12] WEREEGO staff. (2021, 3 11). Récupéré sur QUELS SONT LES AVANTAGES DU POLYPROPYLENE?: « <https://www.weerg.com/fr/fr/blog/quels-sont-les-avantages-du-polypropyl%C3%A8ne> »

[13]Netingbag, « Quels sont les inconvénients du polypropylène? » :

« <https://www.netinbag.com/fr/manufacturing/what-are-the-disadvantages-of-polypropylene.html> »

[14]Statista Research Department. « Production de plastiques dans le monde 1990-2017 », 10 mai 2019.

[15] Quentin Bourgogne, « Contribution à l'étude du comportement mécanique d'un PPS/GF40 sous différents chargements avec prise en compte des effets de l'environnement de sollicitation », décembre 2020

[16] Granulés de polypropylène,4 novembre 2017 : « <https://www.alamyimages.fr/granules-de-polypropylene-formule-chimique-granules-de-plastique-et-l-esprit-de-la-structure-chimique-de-couleur-granules-plastiques-image181881980.html> »

[17]S.i, « formule chimique structurelle et le modèle de molécule de polypropylène » : « https://fr.123rf.com/photo_45466634_formule-chimique-structurelle-et-le-mod%C3%A8le-de-mol%C3%A9cule-de-polypropyl%C3%A8ne.html »

[18]George charpak, " les polymères",2018. (institut villbon):«<https://ramenetessciences.wordpress.com/2018/11/28/les-polymeres/> consulter »

[19]DIFFERBETWEEN, « Différence entre polymère etcopolymère » :

« https://fr.differbetween.com/article/difference_between_polymer_and_copolymer »

[20]MARCROGALLERIA T., "polypropylene": "«<https://www.pslc.ws/french/pp.htm>»

[21]RAMDANE CHERIF M., "étude et conception d'un moule d'injection plastique pour un cache boîte de dérivation, université tizi-ouzou, 2018/2019.

[22]ARIO H., "HDPE 2 with plastic bottle and product package high density polyethylene bottles":« <https://www.dreamstime.com/hdpe-plastic-bottle-product-package-high-density-polyethylene-bottles-recycle-triangle-arrow-sign-flat-style-hdpe-image168091881>»

[23]PIECCEDISCOUN., « Par chocs pour voiture » : « <https://www.piecesdiscount24.fr/pieces/pare-choc>»

[24]ID. environnement(Tous Acteurs), Les industriels s'engagent à des pots de yaourt plus verts,(17/02/2021) : « <https://www.linfodurable.fr/conso/les-industriels-sengagent-pour-des-pots-de-yaourt-plus-verts-24054> »

- [25]gettyimage, « équipement de sportswear » : « <https://www.gettyimages.fr/illustrations/mat%C3%A9riel-de-sport> »
- [26] OULD DADDAH M., « gamme de produits parapharmaceutique » : « <https://tjrapro.com/ad/amid-dispositifs-medicaux-2/> »
- [27]Wikipédia, « lave-vaisselle » : « <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lave-vaisselle> »
- [28]RASJIN R., " Les résines composites, Article de recherche, université médicale virtuelle francophone",2009.
- [29]ALPA POWDER,Les charges minérales et leur rôle dans les revêtements,China Powder Network, 02/11/2020.
- [30]physique et matière, « la licence de documentation libre GNU(2010) »: « [http://www.physique-et-matiere.com/charge_\(substance\).php](http://www.physique-et-matiere.com/charge_(substance).php) »
- [31] Mathildevanne, monographie Talc, université du Québec ,Chicoutimi ,2016
- [32] GARRIN P., 'Les charges et pigments minéraux, Sciences Géologiques', bulletins et mémoires, 46, 267-280, 1993.
- [33] BOUTIN A., 'études des conditions de formations du gisement de talc-chlorite de trimouns" , thèse doctorat, université de Toulouse, 55, 2016
- [34] ENIP, Fiche technique du polyéthylène basse densité, l'entreprise nationale des industries plastique , Skikda, 2008.
- [35]SPERATI C., «The effect of chain branching and molecular weight on physical properties». Journal of AppliedPolymer Science, 1988, 88, 6127-6133.
- [36]Fiche technique du carbonate de calcium fournie par la société internationale «XIAMEN HAITAIDE-Chine», Ningbo (Chine), 2017.
- [37] BAHLOULI S.,«Elaboration, Compatibilisation et Caractérisation de Systèmes Nanocomposites à base de Polyoléfine/Polyamide66/Charge, cas du système: PP/PA66/CaCO₃».Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 85, 2021.
- [38]CAVALIER K., «Carbonate de calcium, additif multifonctionnel».Techniques de l'ingénieur, 2010, AM322.

- [39] ZOKRAMI F., «Elaboration du composite à base de PP/CaCO₃». Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 65, 2009.
- [40] BAHLOULI S., «Elaboration, Compatibilisation et Caractérisation de Systèmes Nanocomposites à base de Polyoléfine/Polyamide66/Charge, cas du système: PP/PA66/CaCO₃». Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 120, 2021.
- [41] CHABERT B., CHABERT J., ESCOUBES M., JEANNE P., LAM T. M. «Fixation sur fibre de verre d'un agent de pontage». Bulletin de la société française chimique de France, 1986, 11, 111-118.
- [42] DOUFNOUNE R., «Contribution à l'étude du comportement des mélanges polymère/charge et la présence d'agents de couplage». Thèse génie des polymères : UFA de Sétif, 2005.
- [43] DOUFNOUNE R., HADDAOUI N., RIAHI F., «The interactions of silane and ziconate coupling agents with calcium carbonate». Inter. J. Polym. Mater., 2007, 56, 227-246.
- [44] JANCAR J., DIANSELM O., « Failure mechanics in elastomers-toughened polypropylene ». Journal of Polymer, 1993, 34, 1684-1694.
- [45] SCHLICKMANN K., and HOWARTH J., « Effect of The Incorporation of Micro and Nanoparticles of Calcium Carbonate in Poly (Vinyl Chloride) Matrix for Industrial Application». Journal Materials Research, 2019, 22, 1598-1600.
- [46] BAHLOULI S., «Contribution à la compatibilisation des mélanges à base de polyoléfines/charge». Thèse de Magister, 2011, 45-48.
- [47] BOUREMEL C., «Etude du comportement mécanique et morphologique des mélanges à base de PP/PEBD avec une charge minérale». Thèse de Magister: UFA-SETIF, 2004, 65-66.
- [48] BOUFASSA S., «Etude des relations morphologie-propriétés des composites hybrides polymère-charge minérale: application au renforcement mécanique du mélange PP/PEHD». Thèse de Magister, UFA-SETIF, 2009, 45-51.
- [49] BAOUZ T., and FELLAHI S., «Interfacial Modification of High Density Polyethylene/Glass Fibbers Reinforced and Non Reinforced Polyamide 66 Blends», Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98, 1748-1756.
- [50] CHATTERJEE A., and MISHRA S., «Rheological, thermal and mechanical properties of nano-calcium carbonate (CaCO₃)/poly methyl methacrylate (PMMA) core-shell nanoparticles reinforced polypropylene (PP) composites », Journal Macromolecules, 2013, 21(5), 474-483

[51]N.C. ABDUL RAZAK., I.M. NUWA IM., A. HASSAN A., and SAMSUDIN SA., «Effects of compatibilizer on mechanical properties of PET/PP blend». *Journal of Composite Interfaces*, 2013, 20(7), 507-515.

[52]WILLIS J.M., and FAVIS B.D., «Effect of mixing history on phase morphology of a poly alloy and poly blend ». *Journal of Polymer Engineering and Science*, 1990, 30, 1073-1080.

[53]BONSE B., and MOLINA M., «Effect of Calcium Carbonate Particle Size and Content on Polyamide 6 Processing and Properties». *AIP Processing*, 2016, 30, 1779-1785.

[54]VANDERMARK A., LEROY L., and GAUCHER V., «Influence of Fatty Chain Length and Starch Composition on structure and properties of Fully Substituted Fatty Acid Starch Esters». *Carbohydrate Polymers*, 2017, 12,23-32.

Résumé : Le présent travail porte sur l'élaboration d'un système à base de Polypropylène PP, renforcé par du talc non traité et traité par l'aminopropyletriéthoxysilane (Silquest A-1100). L'analyse par spectroscopie IRTF a confirmé la structure chimique du PP et du talc, ainsi que traitement par Silquest A-1100 déposé sur les nano charge. L'étude de ces systèmes à travers les propriétés mécaniques (traction/allongement et résistance aux chocs) ont montré un bon renforcement de notre système surtout en ce qui concerne les propriétés en traction contrairement aux propriétés aux chocs qui ont connus une diminution surtout aux taux de charge élevée. Les nano charges traitées avaient un bon impacte sur ces propriétés en assurant une bonne continuité en la matrice PP et talc. L'étude des propriétés rhéologique, par la mesure de l'indice de fluidité a montré que l'ajout de talc diminue la fluidité de l'ensemble des formulations étudiées et par conséquent augmentation de la viscosité. L'analyse morphologique a montré la complexité des systèmes dont la morphologie est affectée par un grand nombre de paramètres (fraction de chaque phase, viscosité, taux de talc...).

Mots clé : Polypropylène, talc, agent de couplage. Composite.

Abstract: This work focuses on the development of a nanocomposite system based on Polypropylene PP, reinforced with nano fillers of talc untreated and treated with aminopropyletriethoxysilane (Silquest A-1100). Analysis by FTIR spectroscopy confirmed the chemical structure of PP and talc, as well as treatment with Silquest A-1100 on the nano-charges by the appearance of characteristic groups. The study of these systems through the mechanical properties (tensile/elongation and impact resistance) has shown a good reinforcement of our system especially with regard to the tensile properties unlike the impact properties which have experienced a decrease especially at the rates high load. The treated nanofillers had a good impact on these properties by ensuring good continuity in the matrix and talc. The study of the rheological properties, by measuring the melt index showed that the addition of talc decreases the fluidity of all the formulations studied and consequently increases the viscosity. Morphological analysis has shown the complexity of systems whose morphology is affected by a large number of parameters (fraction of each phase, viscosity, talc level.....).

Key words: Polypropylene, talc, coupling agent, composite.

ملخص

يركز هذا العمل على تطوير نظام يعتمد على البولي بروبيلين PP معزز بالتلك غير المعالج ومعالج بثلاثي إيثوكسي سيلان أمينوبروبيل (Silquest A-1100). أكد التحليل الطيفي بواسطة FTIR التركيب الكيميائي ل PP والتلك ، بالإضافة إلى المعالجة باستخدام Silquest A-1100 المودعة على حشوات النانو. وقد أظهرت دراسة هذه الأنظمة من خلال الخواص الميكانيكية (الجر / الاستطالة ومقاومة الصدمات) تعزيزا جيدا لنظامنا خاصة فيما يتعلق بخصائص الشد على عكس خصائص التأثير التي شهدت انخفاضا خاصة عند ارتفاع معدلات الحمل. كان للنانوبورات المعالجة تأثير جيد على هذه الخصائص من خلال ضمان استمرارية جيدة في مصفوفة PP والتلك. أظهرت دراسة الخصائص الريولوجية ، من خلال قياس مؤشر السيولة ، أن إضافة التلك تقلل من سيولة جميع التركيبات المدروسة وبالتالي تزيد من اللزوجة. أظهر التحليل المورفولوجي تعقيد الأنظمة التي يتأثر مورفولوجيتها بعدد كبير من المعلمات (جزء من كل مرحلة، اللزوجة، معدل التلك ، إلخ).

الكلمات المفتاحية: بولي بروبيلين، التلك، عامل اقتران، مركب.