

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par : Laouabdia Abdessalem

Saada Imad Eddine

Thème

**Evaluation des propriétés des
composites de polychlorure de vinyle (PVC)**

Soutenu le : /06/2021

Devant le jury :

KHEIREDDINE Abdelaziz	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
REZGUI Imane	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur
Hassini Adel	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

كلمة ابتذلت و فقدت معناها في زمن أفرغ فيه كل شيء من فحواه ، كلمة وصف !الشكر
المولى عز وجل أهلها بالقللة لأنهم تحققوا بحقيقتها و أدركوا أن المشكور الأوحى من سمى نفسه الشكور
المحتجب في سرديات عزه عن أن تدركه الأبصار ، فله الشكر كما شكر نفسه في الأزل ، و له الشكر أن
أهمننا حكاية الشكر عنه .

إذا كان شكري نعمة الله نعمة علي له في مثلها يجب الشكر
فكيف وقوع الشكر إلا بفضله وإن طالت الأيام واتصل العمر
و أثني بشكر معلم الناس الشكر سيدنا و مولانا مُحَمَّدٌ صَلَّى اللهُ عَلَيْهِ وَ عَلَى آلِهِ وَ صحبه و علينا
فيهم ومعهم أجمعين و أثلت بالشكر للأستاذة المشرفة الدكتورة رزقي ايمان علي ما أسدته لنا من معروف
، و الأساتذة الذين قبلوا مناقشة هذا العمل الدكتور خير الدين عبد العزيز والدكتور حسيني عادل
و كل من له علي حق الشكر فله الشكر .

Dédicace

الهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك. ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك. ولا
تطيب الآخرة إلا برحمتك وعفوك. ولا تطيب الجنة إلا برؤيتك

"الله جل جلاله"

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة.. ونصح الأمة.. إلى نبي الرحمة ونور العالمين

"سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم"

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار.. إلى من علمني العطاء بدون انتظار. إلى من أفعمني بصريح

العطف.. إلى من أغدقني بفيض الإحسان.. إلى من أحمل اسمه بكل افتخار

"أبي"

غمرتني بخالص الحب. إلى بسملة الحياة وسر الوجود.. إلى من كان إلى ملاكي في الحياة. إلى التي

دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي

"أمي"

إلى الذين آثروني بالإخاء.. إلى من ناصروني في كل آن.. إلى من أرى التفاؤل بعيونهم والسعادة في

ضحكتهم. إلى من تطلعوا لنجاحي بنظرات الأمل

"إخواني وأخواتي"

إلى الذين صنعوا في النجاح بنور العلم. إلى روائع البيان

"أساتذتي"

إلى من تحلو بالإخاء وتميزوا بالوفاء والعطاء. إلى من أخلصوني الوداد، وأصدقوني الخلان

"أصدقائي"

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les polymères.....	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 Structure des polymères.....	3
a. Polymères linéaires.....	3
b. Polymères ramifiés.....	4
c. Polymères réticulés.....	4
d. Polymères amorphes et polymères cristallisés.....	4
I.2.3 Classification des polymères.....	5
a. Selon leur nature chimique	5
b. Selon l'origine.....	5
c. Selon leur comportement thermique.....	6
d. Selon l'importance économique.....	8
I.2.4 Propriétés des polymères.....	8
a. Les Propriétés physiques	8
b. Les Propriétés thermiques	9
I.2.5 Domaine d'application.....	9
I.3 Polychlorure de vinyle (PVC)	10
I.3.1 Définition.....	10
I.3.2 Les propriétés du PVC.....	11
a. Propriétés chimiques.....	11
b. Propriétés physiques.....	12
c. Propriétés thermiques.....	12
d. Propriétés mécanique.....	12
e. Propriétés électriques.....	15
I.3.3 La production de chlorure de vinyle.....	15

a. La production de chlore.....	16
b. La production du monomère de chlorure de vinyle.....	16
c. La production de PVC.....	16
d. Transformation du PVC en produit fini.....	16
I.3.4 Avantages et Inconvénients du PVC.....	17
a. Les avantages du PVC.....	17
b. Les inconvénients du PVC.....	18
I.3.5 Domaine d'utilisation du PVC.....	18
a. Soins de santé.....	18
b. Emballage.....	18
c. Secteur automobile.....	19
d. Autres applications.....	19
I.4 Les matériaux composites.....	20
I.4.1 Définition.....	20
I.4.2 Les matrices polymères.....	20
a. Les matrices thermodurcissables.....	20
b. Les matrices thermoplastiques	21
I.4.3 L'objectif d'incorporation d'un objet dans un polymère	22
I.4.4 Le carbonate de calcium.....	23
a. Structure et propriétés des carbonates de calcium	23
I.4.5 Dop.....	23
I.4.6 CPW.....	24
I.4.7 Techniques de fabrication des composites	25
a. Méthode par voie en solution.....	25
b. Polymérisation in situ.....	25
c. Extrusion.....	25
I.5 Conclusion.....	26

Chapitre II

La logique floue

II.1 Introduction.....	27
II.2 Historique de la logique floue.....	27
II.3 Définitions.....	27
II.4 Principe de la logique floue.....	28

II.5	Variable linguistique.....	28
II.6	Sous-ensemble flou.....	29
II.6.1	Son support.....	29
II.6.2	Sa hauteur.....	29
II.6.3	Son noyau.....	30
II.7	Fonction d'appartenance.....	30
II.7.1	Fonction triangulaire.....	30
II.7.2	Fonction trapézoïdale.....	30
II.7.3	Fonction gaussienne.....	31
II.8	Les opérations de la logique floue.....	31
II.8.1	Opérateur * NON *.....	31
II.8.2	Opérateur * ET *.....	32
II.8.3	Opérateur * OU *.....	32
II.9	Structure générale de la logique floue.....	33
II.9.1	Interface de fuzzification.....	33
II.9.2	Base de connaissances.....	34
II.9.3	Moteur d'inférence floue.....	34
II.9.4	Interface de défuzzification.....	34
a.	Défuzzification par centre de gravité.....	35
b.	Défuzzification par centre maximum.....	35
c.	Défuzzification par valeur maximum.....	35
II.10	Conclusion.....	36

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1	Introduction.....	37
III.2	Données expérimentales.....	37
III.2.1	Système flou.....	39
III.2.2	Modélisation floue.....	39
a.	Les variables flous.....	39
b.	Les sous-ensembles flous.....	42
III.3	Les règles floues.....	45
III.4	Résultats et discussion.....	47

III.4.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	48
III.4.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales.....	48
III.4.3 Représentation schématique des résultats.....	52
III.4.4 Validation des résultats.....	55
III.5 Conclusion.....	56
Conclusion Générale	57
Bibliographie	58

Liste des Figures

Chapitre I

Étude bibliographique

Figure I.1	polymères linéaires (a: homopolymère, b: copolymère statistique, c: copolymère alterné, d: copolymère séquencé).....	3
Figure I.2	Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b).....	4
Figure I.3	polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.....	4
Figure I.4	Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé	5
Figure I.5	représentation schématique d'un polymère thermoplastique.....	7
Figure I.6	Quelques applications des polymères.....	10
Figure I.7	Polymérisation pvc.....	11
Figure I.8	Courbes de fluage en traction d'un PVC non plastifié.....	14
Figure I.9	Module apparent de rigidité en torsion G d'un PVC plastifié en fonction de la température T.....	14
Figure I.10	schéma de production du PVC.....	17
Figure I.11	Segmentation des applications du PVC.....	20
Figure I.12	Composition d'un matériau composite.....	20
Figure I.13	Structure cristallographique de CaCO_3	23
Figure I.14	phtalate de dioctyle (DOP).....	24

Chapitre II

La logique floue

Figure II.1	Les trois phases de la logique floue.....	28
Figure II.2	Variable linguistique.....	29
Figure II.3	Représentation d'un sous-ensemble flou et principales caractéristique.....	30
Figure II.4	Formes des fonctions d'appartenance.....	31
Figure II.5	Opération *NON*.....	32
Figure II.6	L'opérateur * ET *, réalisé par la formulation de minimum	32
Figure II.7	Opérateur * OU *, réalisé par la formulation du maximum.....	33
Figure II.8	Structure générale.....	33
Figure II.9	Différentes méthodes de défuzzification.....	36

Chapitre III

Résultats et Discussions

Figure III.1	Système floue pour les composites PVC.....	39
Figure III.2	Variables Linguistiques pour le (pvc vierge).....	40
Figure III.3	Variables Linguistiques pour le (pvc recyclé).....	40
Figure III.4	Variables Linguistiques pour la charge (CaCO ₃).....	41
Figure III.5	Variables Linguistiques pour le plastifiant (DOP).....	41
Figure III.6	Variables Linguistiques pour le plastifiant (CPW).....	41
Figure III.7	Variables Linguistiques pour la (Taille des particules de CaCO ₃). ..	41
Figure III.8	Variables Linguistiques pour la résistance à la traction	42
Figure III.9	Variables Linguistiques pour la (la densité).....	42
Figure III.10	Les fonctions d'appartenance triangulaires.....	44
Figure III.11	Les fonctions d'appartenance trapézoïdale.....	45
Figure III.12	Variation de la résistance à la traction (R_m) (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.....	49
Figure III.13	Variation de la densité (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.....	49
Figure III.14	les courbes en deux dimensions de la variation de la résistance à la traction en fonction: (a) de pvc vierge et (b) de pvc recyclé ...	52
Figure III.15	les courbes en deux dimensions de la variation de la densité en fonction: (c) de pvc vierge et (d) de pvc recyclé	54
Figure III.16	Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux de la résistance à la traction des composites de PVC.....	55
Figure III.17	Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux de la densité des composites de PVC.	55

Liste des tableaux

Chapitre I

Étude bibliographique

Tableau I.1	Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	21
Tableau I.2	Caractéristiques des thermoplastiques.....	21

Chapitre III

Résultats et Discussions

Tableau III.1	Données expérimentales des composites PVC.....	37
Tableau III.2	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite PVC.....	40
Tableau III.3	Les règles floues pour les composites PVC.....	46
Tableau III.4	Les résultats du système flou pour les composites PVC.....	50

Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
PVC		polychlorure de vinyle
CPW		cire de paraffine chlorée
DOP		Le phtalate de dioctyle
CACO ₃		Carbonate de calcium
R _m	MPA	Résistance à la traction

Introduction Générale

Introduction Générale

Le poly (chlorure de vinyle) (PVC, $[-CH_2-CHCl-]_n$) a été découvert il y a près de cent ans. Il est largement utilisé dans différentes branches de l'économie et sa production continue de croître. à sa production, sa modification, sa transformation ou sa recirculation, il reste un objet d'étude intéressant.

La popularité et la forte demande de polychlorure de vinyle en Europe en 2014 ont été largement rapportées, mais les demandes de croissance dans l'industrie de la construction, qui est un moteur majeur de la demande de PVC [1].

Présente des propriétés mécaniques, une durabilité, une stabilité et une stabilité relativement bonnes aptitude au traitement en conséquence, il apparaît dans une large gamme de produits de consommation, tels que les tuyaux, les cadres de fenêtres, les emballages, les câbles, revêtements de sol et jouets. Les propriétés requises du PVC peuvent légèrement différer selon le type de produit; où par exemple certains produit nécessitent une ductilité plus élevée tandis que d'autres nécessitent une résistance à la traction plus élevée ou résistance aux chocs, etc. En général, les propriétés de matériau souhaitées.

Les produits en PVC peuvent être obtenus grâce à une formulation avec des additifs, notamment des plastifiants, des charges, des stabilisants, des retardateurs de flamme, des antistatiques et agents colorants, ainsi que PVC recyclé et autres polymères. Plastifiants, tels que le phtalate de di-2-éthylhexyle (DOP), et chlorés de la cire de paraffine (CPW) est ajoutée au PVC pour augmenter sa ductilité, sa ténacité, sa flexibilité et sa maniabilité. Les charges, telles que le carbonate de calcium ($CaCO_3$), le dioxyde de titane, le bois et la farine de silice sont généralement ajouté pour améliorer la rigidité du produit, la résistance à la traction, la résistance aux chocs et à l'abrasion, ainsi que d'autres propriétés. De plus, les charges sont généralement incorporées pour réduire les coûts des produits en PVC. Haute les pourcentages de charge, cependant, peuvent affecter de manière indésirable l'aptitude au traitement, ductilité et résistance des composites PVC. De plus, dans les derniers des décennies, le recyclage du PVC a attiré une grande attention en raison de ses avantages environnementaux et économiques importants. Ainsi, dans les récents ans, il est devenu hautement souhaitable d'utiliser un certain pourcentage de Le PVC comme l'un des ingrédients des composites PVC [2].

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, a pour objet d'étude la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. On peut donc la situer à côté des heuristiques de résolution de problèmes, des systèmes experts, de

l'apprentissage, de l'intelligence artificielle distribuée et même du traitement de la langue naturelle, domaines qui composent les techniques d'intelligence artificielle au sein des sciences cognitives.

Dans cette étude, nous utilisons la logique floue en présence de paramètres d'entrée (pvc vierge, pvc recyclé, CaCO_3 , dop, cpw, et Taille des particules de CaCO_3) pour prédire la résistance à la traction et la densité

Le but du travail est de mettre en Evaluation des propriétés des composites de polychlorure de vinyle (PVC)

Ce mémoire est organisé comme suit :

Chapitre I :

Ce chapitre est consacré une étude bibliographique concernant Les polymères et poly chlorure de vinyle (PVC), et Les matériaux composites

Chapitre II :

Dans le deuxième chapitre, nous parlons de la théorie de la logique floue et de ses Propriétés.

Chapitre III :

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats de simulation et les discussions du cette étude.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale qui résume les différents résultats obtenus.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 Introduction

Les plastiques sont importants dans tous les domaines de la vie, car ils suivent le rythme des temps. Ils contiennent des extraits de pétrole et de sel, qui sont les plus courants dans les diverses industries du PVC, et leurs mélanges sont importants et nécessaires.

Les laboratoires ont pu produire des mélanges de polyvinyles au besoin. Ils étaient résistants à la fracture et à la chaleur, selon les composés ajoutés au mélange de pvc.

I.2 Les polymères

I.2.1 Définition

Le mot polymère d'origine Grec polus -méros, est composé de deux mots, « polus » qui veut dire plusieurs et « méros » qui veut dire partie est par définition une macromolécule organique ou inorganique constituée de l'enchaînement répété d'un même motif.

Les monomères sont liés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Les polymères peuvent être constitués d'un seul motif ou d'un seul monomère dans ce cas on parle d'un homopolymère.

Dans le cas où il y'a deux monomères différents on parle d'un copolymère [3].

I.2.2 Structure des polymères

a. Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide. La figure (I.1) donne différents exemples de polymères linéaires [4].

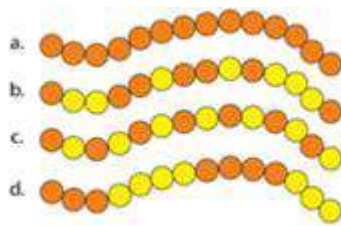


Figure I.1 polymères linéaires (a: homopolymère, b: copolymère statistique, c: copolymère alterné, d: copolymère séquencé)

b. Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires [4].

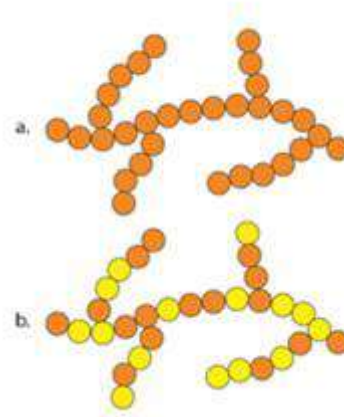


Figure I.2 Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

c. Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau [4].

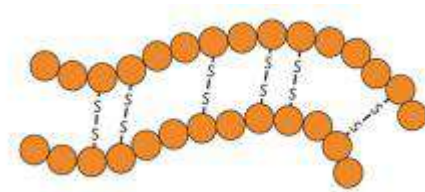


Figure I.3 polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes

d. Polymères amorphes et polymères cristallisés

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituer ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide « figé », sans ordre moléculaire à grande distance. Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles.

Elles peuvent être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : l'aptitude du matériau à diffracter les rayons X selon des angles définis. Ces structures peuvent aussi être objectivables en lumière polarisée.

Dans un polymère, les deux états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline [4].

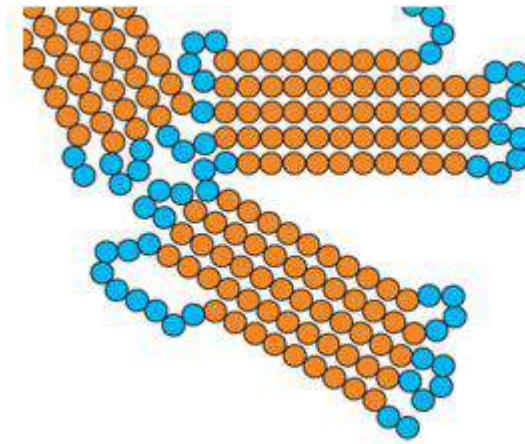


Figure I.4 Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé

I.2.3 Classification des polymères

Il existe plusieurs modes de classification des polymères qui peuvent être classés selon divers critères :

a. Selon leur nature chimique

On distingue :

➤ Polymères minéraux

Ils sont constitués soit de chaînes renfermant un seul corps simple : diamant, graphite, phosphore, soufre...ou de chaînes renfermant plusieurs hétéroatomes : (silicates acides polyphosphoriques, chlorure de polyphosphonitrile) [5].

➤ Polymères organiques

C'est la classe la plus riche comme : les polydiènes, les polyacryliques, les polyamides, les polyvinyles [5].

➤ Polymères mixte

Doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique (300°C-350°C) comme les silicones [5].

b. Selon l'origine

On distingue les polymères naturels, les polymères Artificiels et les polymères synthétiques

➤ Les polymères naturels

Issus des règnes végétal, animal ou minéral leur économie et le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur a assuré une place de premier choix depuis une trentaine d'années. Exemples [5].

Les polysaccharides (cellulose, amidon...).

Les protéines (la laine, le soie...).

Le caoutchouc naturel...

➤ **Les polymères artificiels :(dérivent des polymères naturels)**

Sont obtenus par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés.

Exemples :

Les esters cellulose (nitrocellulose, acétate de cellulose...etc.)

Ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre) [5].

➤ **Les polymères synthétiques**

Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature. Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels [5].

c. Selon leur comportement thermique

Les propriétés des polymères permettent des usages très variés. On peut ainsi les regrouper dans trois familles :

- Les thermoplastiques
- Les thermodurcissables
- Les élastomères

Tous ces polymères peuvent être des homopolymères ou des copolymères et peuvent être obtenus par polymérisation (polymérisation en chaîne ou polycondensation) .ils se différencient par l'architecture de leur macromolécules (linéaire, ramifiée ou réseau tridimensionnel), par leur Mise en œuvre plus ou moins aisée et par leur propriété d'élasticité [5].

➤ **Thermoplastiques**

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons

faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes. Elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leur nouvelle forme.

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit plus de 35 millions de tonnes ! Avant transformation, ils sont sous forme de granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable [6].

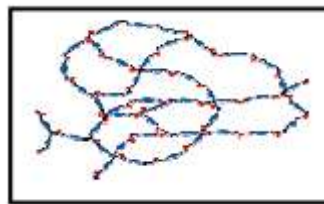


Figure I.5 représentation schématique d'un polymère thermoplastique .

➤ Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes.

Les thermodurcissables représentent 20% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soit environ 10 millions de tonnes. Les plus connus sont les polyuréthanes, les polyester, les phénoplastes, les aminoplastes, les élastomères, les résines époxydes et phénoliques Au départ, les thermodurcissables se présentent sous forme de poudres ou de résines qui subissent une transformation chimique au cours de leur chauffage, de leur refroidissement ou par l'action de durcisseurs [6].

➤ Les élastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et

se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques. Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue d'utilisations spécifiques. Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des semelles de chaussures ou des pneus [6].

d. Selon l'importance économique

Pour les polymères comme tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux [5].

➤ Les polymères de grande diffusion

Dont le volume des ventes et de productions est élevé et dont le prix est faible
Exemple: le Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), Polychlorure de vinyle (PVC).

➤ Les polymères à haute performance

Dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés.

➤ Les polymères techniques

Dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes.
Exemple: polyamide [5].

I.2.4 Propriétés des polymères

a. Les Propriétés physiques

Les propriétés physiques des matériaux polymères sont une moyenne de celles des composants quand il s'agit de masse volumique ou de la reprise d'humidité. Pour le reste, ces matériaux sont souvent inhomogènes et il n'y a pas de règle d'addition pour prévoir les propriétés à partir de celles des composants [7].

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est :

➤ **La masse volumique**

La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion.

En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone) [7].

b. Les Propriétés thermiques

➤ **La température**

La température de transition vitreuse "**T_g**" et la température de fusion "**T_f**" sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères.

La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement

Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents.

Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semicristallins dans un domaine même étroit de la température [7].

I.2.5 Domaine d'application

Les polymères sont fortement utilisés dans (Figure I.6):

- L'emballage des produits alimentaires, emballage de transport,
- Les secteurs du bâtiment,
- Les secteurs de l'automobile, l'aéronautique et les bateaux,
- L'industrie de l'électroménager, du textile, de l'électricité et de l'agriculture.



Figure I.6 Quelques applications des polymères

I.3 Polychlorure de vinyle (PVC)

I.3.1 Définition

PVC : ces trois lettres signifient "polychlorure de vinyle" — ou "poly-vinyl chloride" en anglais — c'est-à-dire l'une des principales matières plastiques utilisées dans le monde.

Les premières matières plastiques, inventées par L. H. Baekeland (d'où le nom des bakélites), virent le jour à la fin du 19^e siècle : elles servirent, notamment à fabriquer des contacteurs électriques.

Mais c'est pendant la guerre de 1914-1918, en raison de la pénurie de nombreux matériaux, que les plastiques vont s'imposer, grâce aux innovations qui permettent sans cesse d'améliorer leurs performances.

L'invention puis le développement du PVC symbolisent parfaitement l'essor formidable des matières plastiques.

Le polychlorure de vinyle a été découvert en 1835 par le physicien français Victor Regnault. Grâce à Fritz Klatte qui met au point des procédés de fabrication, le PVC fait l'objet d'un développement industriel à partir de 1912. La production industrielle à grande échelle débute en 1938 et la première unité française de production de PVC démarre un an plus tard.

Le PVC est composé de chlore (57 % en poids) et d'éthylène, hydrocarbure composé de carbone et d'hydrogène (43 %) issu du pétrole. Le chlore est obtenu par électrolyse du sel (chlorure de sodium : NaCl). En France, son principal débouché est la fabrication du PVC qui consomme 46% de la production annuelle de chlore qui a été de 1,458 millions de tonnes en 1996.

Par réaction entre le chlore et l'éthylène, on obtient le chlorure de vinyle monomère (CVM) qui, par polymérisation, donne le PVC. La polymérisation est la réaction chimique

par laquelle les molécules s'additionnent les unes aux autres pour former une chaîne de grande longueur. Le schéma est le suivant [8].

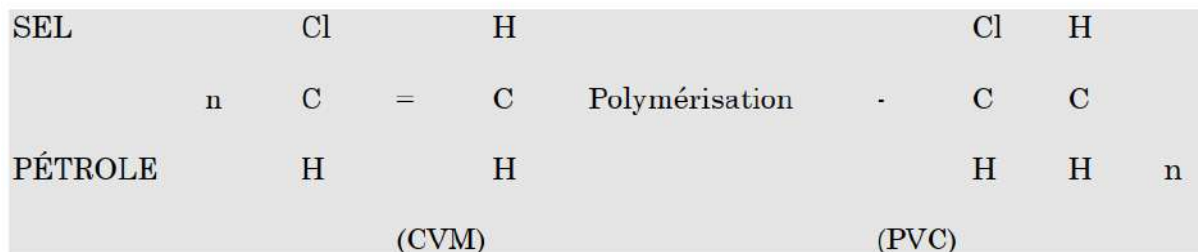


Figure I.7 Polymérisation pvc

I.3.2 Les propriétés du PVC

a. Propriétés chimiques

➤ Résistance aux agents chimiques

Le PVC non plastifié possède une excellente résistance à de nombreux produits chimiques ce qui permet de l'utiliser dans une gamme étendue d'applications où cette qualité revêt une importance primordiale :

- Réservoirs et canalisations utilisés pour le stockage et le transport de produits corrosifs (acides, bases, etc.)
- Canalisations de décharge, ventilateurs d'extraction, hottes ;
- Canalisations souterraines pour adduction, drainage et évacuation d'eau, grâce à sa résistance à l'action des sols corrosifs [9].

En galvanoplastie, l'excellente résistance chimique du PVC rigide est mise à profit pour le revêtement de bacs et d'autres accessoires (tuyaux, soupapes, etc.).

Par ailleurs, la résistance aux huiles et graisses du PVC non plastifié revêt une importance essentielle pour la plupart des industries, notamment pour l'industrie automobile.

À l'inverse, le PVC non plastifié :

- Est sensible à certains solvants organiques (aromatiques, cétoniques, chlorés) ;
- Il est attaqué par le brome et le fluor, mais résiste parfaitement au chlore à la température ambiante.

La résistance aux agents chimiques du PVC plastifié varie en fonction du type et de la quantité de plastifiant incorporé dans la composition [9].

b. Propriétés physiques

Le PVC est un polymère tactique, donc essentiellement amorphe, mais il arrive que, localement, sur des courts segments de chaînes, le PVC soit syndiotactique et puisse s'organiser en phase cristalline, bien que le taux de cristallinité ne dépasse pas les 10 à 15%. La masse volumique est de 1.38 g/cm^3 . Le PVC amorphe est transparent et relativement perméable à la vapeur d'eau [10].

c. Propriétés thermiques

➤ Conductivité thermique

Environ $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

➤ Capacité thermique massique

Environ $1\,046 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

➤ Pouvoir calorifique

Il est de 17 kJ/kg environ, pour les PVC non plastifiés et de valeur supérieure, mais variable suivant la formulation pour les PVC plastifiés.

➤ Coefficient de dilatation linéique

Environ 5×10^{-5} à $8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ pour les PVC non plastifiés.

Il est moins significatif pour les PVC plastifiés [9].

Exemple

La dilatation d'une plaque rigide est d'environ $2,5 \text{ mm}$ par mètre linéaire pour une différence de température de 50 C° [9].

d. Propriétés mécanique

Elles sont mesurées à température ambiante (23 C°) et 50% d'humidité relative, selon les méthodes normalisées

➤ Dureté

Selon la teneur en plastifiant de la composition de PVC initiale, on mesure la dureté Shore A ou D :

Pour les mélanges plastifiés (souples), elle varie de 40 à 80 unités Shore A

Pour les mélanges peu ou non plastifiés (semi-rigides ou rigides), elle est d'environ 30 à 80 unités Shore D [9].

➤ **Module d'Young en flexion**

Il peut atteindre environ 2 500 à 3 000 MPa pour les PVC non plastifiés. Pour les plastifiés, il est inférieur à 1 500 MPa et varie dans de larges limites !

Cette valeur seuil de 1 500 MPa a été retenue conventionnellement par le Comité technique international ISO TC 61 (Plastiques) et l'AFNOR, pour permettre la distinction entre les PVC plastifiés et ceux non plastifiés [9].

➤ **Contrainte à la rupture en traction**

Elle varie environ de 30 à 60 MPa pour les PVC non plastifiés et de 10 à 25 MPa pour la plupart des plastifiés (valeurs dépendant de la vitesse de sollicitation et de la teneur en plastifiant).

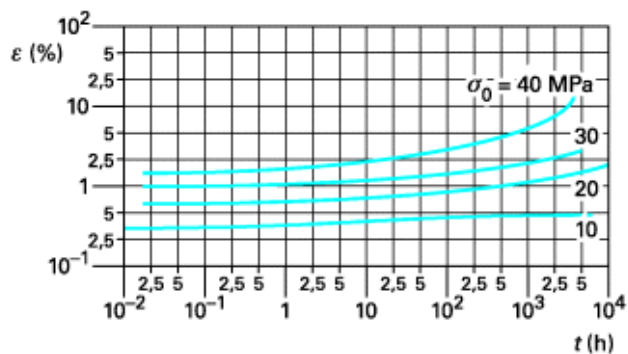
Pour des produits finis bi-orientés à base de PVC non plastifié, la contrainte à la rupture en traction peut atteindre 90 MPa [9].

➤ **Allongement à la rupture en traction**

Il est de l'ordre de 100 % pour les PVC non plastifiés et, en moyenne, de 500 % pour les plastifiés (valeurs dépendant fortement de la vitesse de sollicitation et de la teneur en plastifiant).

➤ **Fluage en traction**

La figure (I.8) donne, pour différentes contraintes, les courbes de fluage, à 20 C°, d'éprouvettes prélevées dans des plaques obtenues par pressage 3.10 d'une composition non plastifiée à base de PVC.



ϵ (%) allongement
 t (h) temps de maintien sous charge
 σ_0 (MPa) contrainte appliquée
 (1 MPa = 0,1 daN/mm² = 10 daN/cm²)

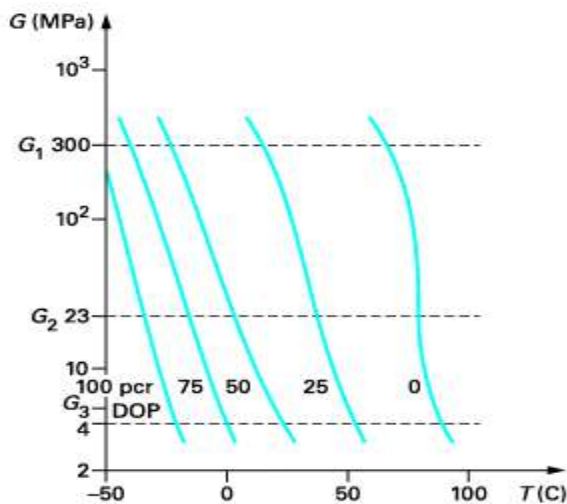
Température : 20 C
 Éprouvettes prélevées dans des plaques obtenues par pressage (§ 3.10)

Figure I.8 Courbes de fluage en traction d'un PVC non plastifié

➤ **Rigidité en torsion**

Cette mesure est parfois encore effectuée sur un torsiomètre du type Clash et Berg qui permet de déterminer, en fonction de la température, du taux et de la nature du plastifiant, l'évolution du module apparent de rigidité en torsion du matériau.

À partir du tracé de la courbe $G = f(T)$, on déduit 3 températures caractéristiques, correspondant aux modules $G_1 = 300$ MPa, $G_2 = 23$ MPa et $G_3 = 4$ MPa (figure I. 9) [9].



G_1, G_2, G_3 points caractéristiques définis dans la norme NF ISO 458-2 de septembre 1986.

Les valeurs indiquées au bas des courbes sont les teneurs en **plastifiant DOP** (phtalate de dioctyle), exprimées en pcr (pour cent parties de résine de PVC pur).

Figure I.9 : Module apparent de rigidité en torsion G d'un PVC plastifié en fonction de la température T

Aujourd'hui, on préfère cependant les spectromètres mécaniques dynamiques qui donnent les modules de traction, de flexion, de cisaillement ou de torsion, sur un barreau à section rectangulaire. Le module complexe obtenu, en fonction de la température, est décomposé en une partie élastique et une autre, dite visqueuse ou pseudo-plastique.

Le rapport module visqueux/module élastique donne une caractéristique appelée « amortissement » ou tangente delta (Tg delta). Le maximum de Tg delta correspond à la transition vitreuse (mécanique) [9].

e. Propriétés électriques

Les objets à base de PVC présentent généralement de bonnes propriétés d'isolation électrique [9].

La principale caractéristique mesurée concerne la résistivité transversale, variable selon la formulation.

À 23 C°, on a :

Pour les PVC non plastifiés :

$$\rho_t = 10^{16} \Omega .cm \quad (I.1)$$

Pour les PVC plastifiés :

$$\rho_t = 10^{10} \text{ à } 10^{16} \Omega .cm \quad (I.2)$$

Pour certaines applications, il est possible de réaliser des produits semi-conducteurs à partir de compositions de PVC particulières [9].

I.3.3 La production de chlorure de vinyle

Le processus de production comprend cinq étapes :

- Extraction du pétrole et du sel.
- Production de chlore et d'éthylène
- Synthèse du chlorure de vinyle monomère (MVC) à partir du chlore et de l'éthylène
- Polymérisation (constitution d'une chaîne moléculaire) du chlorure de vinyle en chlorure de polyvinyle (PVC)

- Transformation du PVC en produit [11].

a. La production de chlore

Le chlore est produit par électrolyse du sel de cuisine (chlorure de sodium ou NaCl). Par cette électrolyse, du chlore gazeux (Cl_2) se dégage à l'anode, et de la soude caustique en solution (NaOH) et de l'hydrogène (H_2) à la cathode. La soude caustique est un produit chimique de grande consommation et est notamment utilisée dans l'industrie du papier, de l'aluminium et des savons ainsi que pour l'épuration des eaux et le nettoyage des bouteilles en verre [11].

b. La production du monomère de chlorure de vinyle

La production du MVC (chlorure de vinyle monomère), l'élément structural du PVC, se fait en 2 étapes. Dans une première étape, l'éthylène et le chlore (ou du chlorure d'hydrogène, HCl) sont combinés par chloration directe ou oxychloration au dichloroéthane (EDC). Ce dichloroéthane est ensuite craqué en chlorure de vinyle monomère et en chlorure d'hydrogène. Le chlorure d'hydrogène est recyclé dans le processus d'oxychloration [11].

c. La production de PVC

Dans un grand récipient (autoclave), on mélange fermement le MVC avec une certaine quantité d'eau (formation d'une longue chaîne d'éléments de MVC). Lorsque 90 % du MVC est polymérisé, la réaction est arrêtée. Après séchage et tamisage, le PVC est stocké et emballé sous forme de poudre blanche inerte [11].

d. Transformation du PVC en produit fini

En fonction de l'application, différentes substances sont mélangées à la poudre de PVC. L'ajout de ces substances permet d'une part un meilleur façonnage et détermine d'autre part les caractéristiques du produit fini.

Le mélange obtenu, appelé compound, pourra maintenant être mis en œuvre (par injection, extrusion, calandrage) pour obtenir le produit fini souhaité [11].

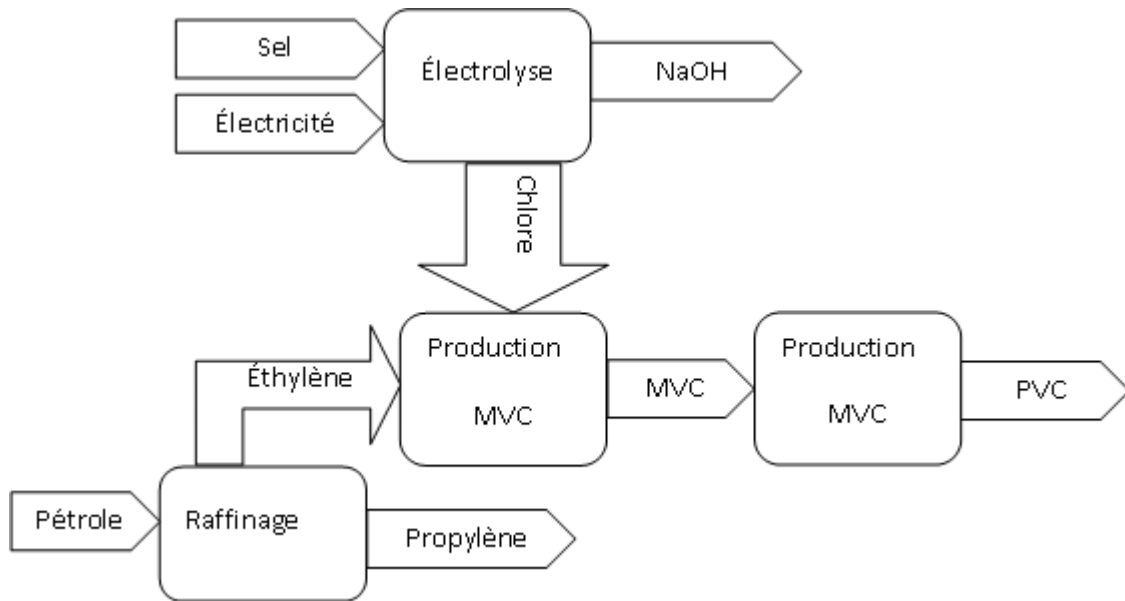


Figure I.10: schéma de production du PVC

I.3.4 Avantages et Inconvénients du PVC

a. Les avantages du PVC

- Le PVC est un matériau peu coûteux et léger ; et en tant que tel, facile à manipuler et à installer.
- Le PVC est également un matériau durable et n'est pas affecté par la corrosion ou d'autres formes de dégradation. Il peut facilement être converti en différentes formes, ce qui fait de son utilisation dans diverses industries, un avantage évident.
- Étant un thermoplastique, il peut être recyclé et transformé en nouveaux produits pour différentes utilisations, mais ce n'est pas un processus facile en raison des nombreuses formulations utilisées pour fabriquer du PVC.
- Il présente également une excellente stabilité chimique. Cette caractéristique garantit qu'il maintient ses propriétés sans subir de changements significatifs lorsque le produit en PVC est soumis à d'autres produits chimiques.
- Le PVC présente également les avantages suivants :
 - Biocompatibilité
 - Clarté et transparence
 - Faible conductivité thermique
 - Nécessite peu ou pas d'entretien [12].

b. Les inconvénients du PVC

- Le PVC est souvent appelé « poison en plastique », et cela est dû aux toxines qu'il peut libérer pendant sa fabrication. Ces toxines ont été à l'origine de problèmes de santé chez les personnes exposés, provoquant des maladies telles que le cancer, les problèmes de développement de la naissance, la perturbation endocrinienne, l'asthme et les problèmes pulmonaires.
- Un autre inconvénient réside dans le fait que du PVC de mauvaise qualité circule sur le marché et qu'il est difficile pour les non-connaisseurs de les reconnaître. Ces produits sont alors fragiles et sont sujets à de nombreux problèmes [12].

I.3.5 Domaine d'utilisation du PVC

a. Soins de santé

Pendant déjà un demi-siècle, le PVC a profité au secteur de soins de santé. Nombre de vies ont pu être sauvées grâce à la mise en œuvre de matières plastiques, et de PVC en particulier. Il faut savoir que plus de 25 % des équipements médicaux en matière synthétique sont en PVC [11].

Nous le retrouvons dans les applications très diverses :

- poches à sang
- cathéters
- toutes sortes de conduites et petits tubes;
- gants chirurgicaux
- masques à oxygène
- emballages stériles
- équipement médical divers

b. Emballage

Le PVC est aussi bien utilisé pour les emballages de produits alimentaires que pour les produits pharmaceutiques. Le grand avantage de l'utilisation du PVC comme matériau d'emballage réside dans ses propriétés uniques qui font en sorte que les légumes et la viande restent plus longtemps frais [11].

c. Secteur automobile

La durée de vie moyenne d'une voiture est actuellement de 17 ans ! En 1970, elle n'était que de 11 ans. Le PVC a particulièrement contribué à cette prolongation. En Europe de l'Ouest, une voiture contient actuellement de 10 à 16 kg de PVC. L'application d'une couche de protection de bas de caisse n'en est qu'un exemple.

D'autres applications courantes sont le revêtement de portes et de tableau de bord. Le PVC des revêtements intérieurs assure une absorption du bruit, et augmente ainsi le confort du conducteur et des passagers, tout en diminuant le facteur stress [11].

d. Autres applications

- La fabrication de tuyauteries, aisément assemblées au moyen d'un collodion dans le tétrahydrofurane. Cette application est liée à son faible coût, son inertie chimique et sa très bonne résistance à la température ambiante.
- Les fibres de PVC.
- Le caractère isolant électrique du PVC lui ouvre le marché du petit matériel électrique.
- Bouteilles, corps creux profilés
- Plaques, feuilles, films, disques
- Objets moulés.
- Mousses et divers fibres à la forme plastifiée.
- Feuilles, films.
- Revêtement de sols calandrés.
- Revêtement de sols enduits.
- Tissus enduits, papier et câble.
- Chaussure, produits moulés plastique

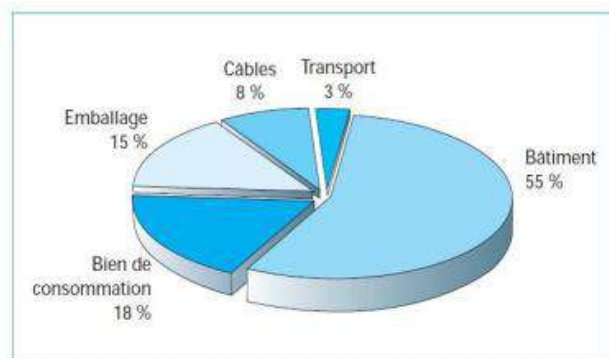


Figure I.11 Segmentation des applications du PVC [13].

I.4 Les matériaux composites

I.4.1 Définition

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère seul sont insuffisantes pour conférer à l'objet que l'on veut fabriquer, toutes les propriétés souhaitées en terme de rigidité, résistance mécanique, légèreté ou autre propriété physico-chimique, électrique, optique...C'est cela, qu'on s'oriente de plus en plus vers les matériaux composites [10].

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées. (Source Action Composite) Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple, le béton, la boue, le contreplaqué...), ce terme s'adresse plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice polymère et d'un élément renforçant de type fibreux tel que défini dans la figure (I.12) [14].

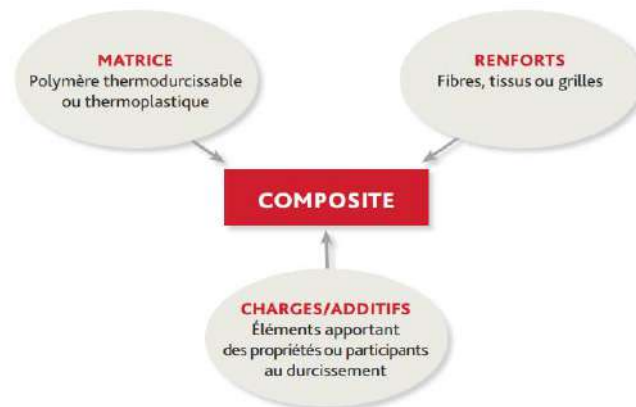


Figure I.12 Composition d'un matériau composite

I.4.2 Les matrices polymères

a. Les matrices thermodurcissables

Les matrices thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques meilleurs par rapport aux thermoplastiques. On distingue principalement les polyesters insaturés, les résines époxydes et d'autres résines telles que les phénoliques, les aminoplastes, les furaniques, etc. Ces polymères se présentent toujours sous forme amorphe. Le tableau I.1 résume les propriétés physico-mécaniques des résines thermodurcissables les plus utilisées. Des charges et des additifs sont fréquemment incorporés dans la structure de ces polymères, leur rôle est d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques, de diminuer les coûts et de faciliter la mise en œuvre ou la forme. Globalement, on remarque que ces matrices

possèdent un haut module d'élasticité, exception faite pour l'uréthane, et que leur température de mise en œuvre s'étend sur une large gamme. Dans certains cas, la température maximale d'utilisation peut paraître faible si on envisage des applications dans des domaines où les matériaux peuvent subir une contrainte thermique [10].

Tableau I.1: Caractéristiques des résines thermodurcissables

Résine	Densité	E (GPa)	σ_r (MPa)	Tmax (°C)
Epoxyde	1.2	4.5	130	90-200
Uréthane	1.1	0.7-7	30	100
Polyester insaturé	1.2	4	80	60-200
Urée Formaldéhyde	1.2-1.5	6-10	40-80	140
Phénol Formaldéhyde	1.1-1.3	3-4	35-60	80-300

b. Les matrices thermoplastiques

Les matrices thermoplastiques sont les plus utilisées, compte tenu de leur facilité de mise en œuvre et de leur faible coût. Elles se présentent sous forme semi cristallines. Ces macromolécules sont formées à partir de monomères de fonctionnalité moyenne, voisine de 2. Leur recyclabilité et leur thermo réversibilité constituent des avantages très importants. Il existe aussi des thermoplastiques à usage spécifique qui peuvent résister à des températures de l'ordre de 200°C. Les principales familles des thermoplastiques sont les polyoléfines (les polyéthylènes, les polypropylènes), les plastiques à base de polychlorure de vinyle, les acryliques et les polystyrènes. Le tableau I.2 regroupe certaines des propriétés physico mécaniques des résines les plus utilisées. Les propriétés de ces dernières (module d'élasticité) sont nettement inférieures à celles relatives aux résines thermodurcissables, tandis que leurs températures de mise en œuvre demeurent légèrement supérieures (140 à 270°C) [10].

Tableau I.2 : Caractéristiques des thermoplastiques

Polymère	Tg (°C)	Tf (°C)	Densité	σ_r (MPa)	E (GPa)
PP	5	165	0.92	30	1.2
PLA	50-60	150	--	40-60	3-4
HDPE	100	134	0.95	28	1.1
PVC	75-105	160-220	1.39	58	2.9
PS	90-100	-	1.05	55	3.2
PET	70	255-265	1.30	47	2.6
ABS	90-120	-	1.05	50	2.5

I.4.3 L'objectif d'incorporation d'un objet dans un polymère

Les propriétés intrinsèques d'un objet (micrométrique ou nanométrique) peuvent permettre de conférer au matériau des propriétés spécifiques telles que magnétiques ou électriques et/ou de modifier ses propriétés thermiques, mécaniques ou optiques. Il existe deux raisons essentielles pour l'introduction d'un objet de dimension nanométrique plutôt qu'un objet de dimension micrométrique :

- L'interface polymère/charge est décuplée grâce à la taille nanométrique de l'objet par rapport à un objet micrométrique.
- Le nano-objet peut se structurer à plusieurs échelles au sein du matériau.

L'utilisation des nano charges à la place des charges traditionnelles de taille micrométrique permet d'obtenir des propriétés mécaniques intéressantes à des taux de la charge plus bas, Les nano composites peuvent pallier à certaines de ces limites et présentent des avantages face aux composites classiques à renforts micrométriques :

- Une amélioration significative des propriétés mécaniques notamment de la résistance sans compromettre la ductilité du matériau car la faible taille des particules ne crée pas de larges concentrations de contrainte.
- Une augmentation de la conductivité thermique et de diverses propriétés notamment optiques qui ne s'expliquent pas par les approches classiques des mélanges de composants. Les nanoparticules, ayant des dimensions au-dessous des longueurs d'onde de la lumière visible (380-780 nm), permettent au matériau de conserver ses propriétés optiques de départ ainsi qu'un bon état de la surface
- La diminution de la taille des renforts que l'on insère dans la matrice conduit à une très importante augmentation de la surface de l'interface dans le composite. Or, c'est précisément cette interface qui contrôle l'interaction entre la matrice et les renforts, expliquant en partie Les propriétés singulières des nano composites [7].

I.4.4 Le carbonate de calcium

a. Structure et propriétés des carbonates de calcium

Le carbonate de calcium est un composé ionique qui existe sous six formes allotropiques différentes : la calcite, l'aragonite, la vaterite, le CaCO_3 monohydrate, le CaCO_3 hexa hydraté et le CaCO_3 amorphe [7].

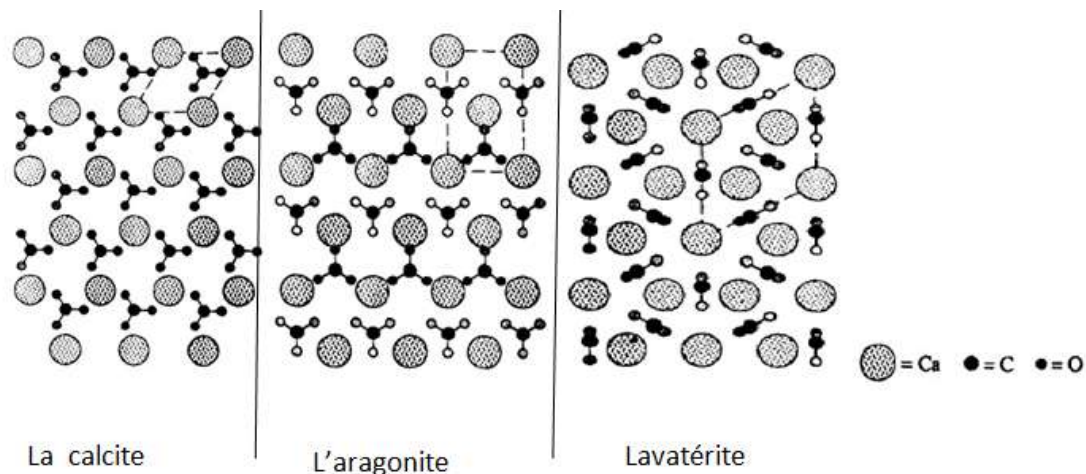


Figure I.13 Structure cristallographique de CaCO_3

Le carbonate de calcium naturel est issu soit des calcaires, anciens dépôts sédimentaires marins d'origine chimique, soit de craies, anciens dépôts d'origine biologique, ou encore de marbres, calcaires d'origines métamorphiques.

Le carbonate de calcium naturel est généralement utilisé comme nano charge dans des composites à matrices polymères telles que le polychlorure de vinyle, les polyuréthanes ou les polyoléfines. Le CCN ayant un coût de production faible, il est souvent utilisé à des taux de charges élevés au sein des formulations afin d'en réduire les coûts. Il présente aussi des impuretés chimiques et une distribution granulométrique plus importante que le carbonate de calcium de synthèse, dit « précipité » [7].

I.4.5 Dop

Le phtalate de dioctyle (DOP), un plastifiant industriel, est préparé en traitant l'hexanol de 2-éthyle avec de l'anhydride phtalique en phase liquide, soit avec un stade intermédiaire monoester, soit par voie directe. Pour l'estérification de l'anhydride phtalique avec l'hexanol 2-éthyle, on utilise normalement de l'acide sulfurique. Cependant, elle pose de nombreux problèmes tels que la corrosion des réacteurs, les difficultés de séparation des produits et de récupération des catalyseurs, la pollution par les eaux usées acides et la mauvaise qualité du DOP en raison des sulfites présents dans le produit. Les autres catalyseurs utilisés sont l'acide

p-toluène sui phonique (PTSA), l'acide méthane sui phonique (MSA), l'acide chlorhydrique, l'acide phosphorique, etc.

De plus, on sait que ces catalyseurs colorent le produit en raison de la formation de sous-produits et qu'ils ne peuvent pas être réutilisés. En ce qui concerne l'environnement, il existe un effort mondial visant à remplacer les catalyseurs d'acide liquide classiques par des acides solides moins toxiques, facilement séparables des produits, faciles à manipuler et réutilisables. Il a été observé qu'au cours des dernières années, le DOP a été synthétisé en utilisant une variété de catalyseurs acides solides [15].

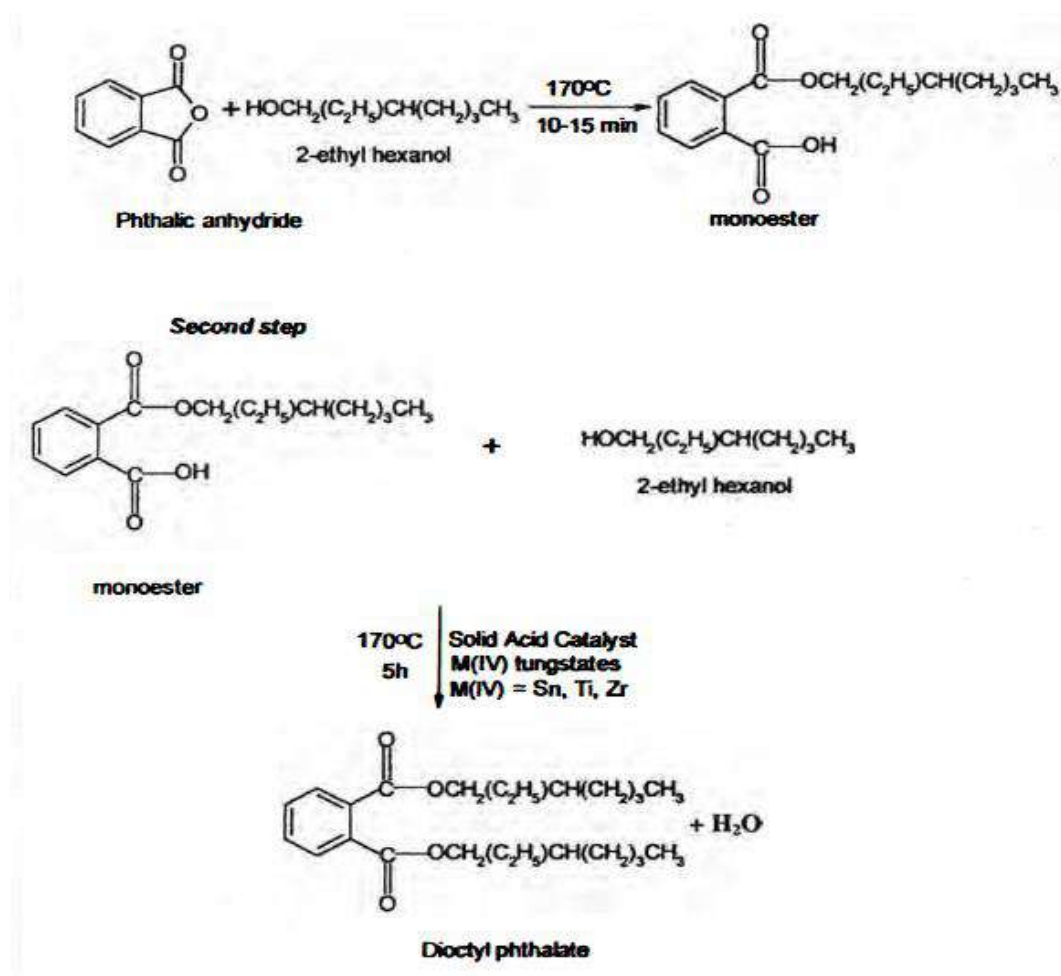


Figure I.14 phtalate de dioctyle (DOP)

I.4.6 CPW

La paraffine chlorée est des huiles incolores ou jaunâtres, visqueuses et denses, sauf pour les paraffines chlorées à longue chaîne de carbone à haute teneur en chlore (environ 70%), qui sont solides. Paraffine chlorée offre des avantages tels que l'ignifugation et la basse température et augmente la flexibilité des matériaux

La cire de paraffine chlorée est l'un des principaux plastifiants secondaires utilisés dans la fabrication de PVC flexible. Utilisation de cire de paraffine chlorée augmente la propriété ignifuge des produits en PVC tels que le PVC câbles et revêtements de sol. De plus, coût inférieur de la cire de paraffine chlorée vis-à-vis des autres plastifiants abaisse le coût global de fabrication. La cire de paraffine chlorée est utilisée comme plastifiant dans les peintures et revêtements, les mastics et adhésifs, et les produits en caoutchouc tels que les courroies industrielles et bandes transporteuses en raison de propriétés telles que l'ignifugation et inertie [16].

I.4.7 Techniques de fabrication des composites

Procédés de mise en œuvre des matériaux composites

Les trois procédés les plus connus de production de matériaux composites sont méthode par voie en solution, polymérisation in situ et la méthode à l'état fondue

a. Méthode par voie en solution

Elle consiste à dissoudre la matrice dans un solvant puis à introduire la charge afin de l'activer grâce à un agent, souvent oxydant. L'ensemble subit ensuite une précipitation puis il est filtré et séché.

b. Polymérisation in situ

On peut aussi disperser la matrice dans un non solvant ou polymériser le monomère et/ou la charge in situ. Cette méthode a été retenue pour la synthèse de matériaux composites possédant des propriétés électriques. L'inconvénient majeur dans ce type de procédé est la nécessité que les constituants possèdent des propriétés chimiques proches, et, en particulier, qu'ils soient compatibles avec un même solvant.

De plus, il convient que le composite résultant soit non soluble dans ce solvant. Enfin, ce genre de réaction s'effectue souvent en milieu agité, et les conditions d'agitation sont parfois difficiles à contrôler dans le cas d'un milieu évolutif. Cela peut alors générer une inhomogénéité des propriétés d'usage du matériau composite [17].

c. Extrusion

Dans le cas d'une production par extrusion, les produits, initialement sous forme de poudre, flocons, paillettes, granulés, fibres, sont préchauffés avant d'être introduits en amont d'une vis extrudeuse qui permet de disperser la charge dans la matrice et d'effectuer ainsi un mélange intime entre les constituants. Cette méthode nécessite une compatibilité thermique

entre les produits. En particulier, lorsque plusieurs polymères sont utilisés, il ne faut pas que l'un d'eux soit thermiquement dégradé tandis que d'autres ne sont pas fondus. En outre, les contraintes de cisaillement doivent être choisies pour disperser parfaitement. La charge dans la matrice et éviter les points de concentration de charge résultant de l'agglomération de celle-ci. Enfin, se pose également le problème de compatibilité d'interface entre les constituants. Pour pallier ce problème, des agents couplant peuvent être introduits dans le mélange afin de modifier les charges de surface et améliorer l'adhésion à l'interface matrice/charge [17].

I.5 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les polymères, les classifications et les propriétés du polymère, dans la deuxième partie nous avons introduit le polychlorure de vinyle (PVC), les propriétés et la production du chlorure de vinyle, et le domaine d'utilisation du PVC, dans la troisième et dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté les composites, matrices polymères et des généralités sur les composés suivants (CaCO_3 , Dop, Cpw).

Chapitre II

La logique floue

II.1 Introduction

La logique floue est l'une des méthodes de prévision d'événements sur laquelle de nombreux scientifiques se concentrent pour ses avantages technologiques et prédisent les résultats expérimentaux sans avoir recours à de nombreux tests

Dans ce chapitre, nous présentons le principe, les fonctions la structure générale de la logique floue.

II.2 Historique de la logique floue

Ce fut en 1965 que le professeur L.A. Zadeh de l'université de Berkeley au Etats Unis publie, pour la première fois, un article parlant des ensembles flous (Fuzzy Sets). Accompagné de nombreux chercheurs, il a réalisé par la suite plusieurs avancées théoriques majeures. En 1974, en Angleterre, Mamdani et Assilian réalise le premier contrôleur à logique floue qui sera, l'année suivante, implémente dans un four à ciment pour une compagnie danoise C'est dans les années 1980, au Japon, que plusieurs applications industrielles adoptent la logique floue. Durant les années 1990, on aperçoit de plus en plus d'applications en Europe, ainsi qu'aux Etats-Unis. Aujourd'hui, la logique floue est une réalité qui fait partie de la vie de tous les jours. On la trouve notamment dans les machines à laver, dans les caméscopes, les systèmes de ventilations, l'industrie automobile et également dans les logiciels de finances et de diagnostics. Dans le domaine du contrôle de moteurs, on utilise de plus en plus la logique floue car elle permet de contrer les problèmes de non-linéarité du système. Elle offre également une simplification au niveau du dimensionnement du contrôleur, ainsi que de meilleures performances au niveau du réglage [18].

II.3 Définition

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh. A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive. Les notions de température moyenne ou de courant faible sont relativement difficiles à spécifier de manière précise. On peut fixer des seuils et considérer que l'on attribue tel ou tel qualificatif en fonction de la valeur de la variable par rapport à ces seuils. Ceci ne peut exprimer qu'un avis très tranché du qualificatif "température moyenne" par exemple. L'aspect "vague" de ce qualificatif n'est pas représenté [19].

II.4 Principe de la logique floue

La logique floue trouve ses origines dans un certain nombre de constatations :

- La connaissance que l'être humain a d'une situation quelconque est généralement imparfaite.
- L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives : la précision des données est souvent inutile : par exemple pour choisir un appartement, il pourra prendre en compte la surface, la proximité des commerces, la distance du lieu de travail, le loyer sans pour autant avoir besoin d'une valeur précise de chacune des données.
- Dans l'industrie ou les techniques, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple sans avoir besoin de modéliser le système. De même, tout le monde sait qu'un modèle mathématique n'est pas nécessaire pour conduire une voiture et pourtant une voiture est un système très complexe.
- Plus la complexité d'un système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement.

De ces constatations viennent naturellement les déductions suivantes :

- Plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système ;
- Plutôt que par des valeurs numériques précises, le fonctionnement doit être décrit par des qualificatifs globaux traduisant l'état approximatif des variables.

La logique floue se divise en trois parties bien distinctes, la fuzzification, les règles d'inférences et la défuzzification [18].

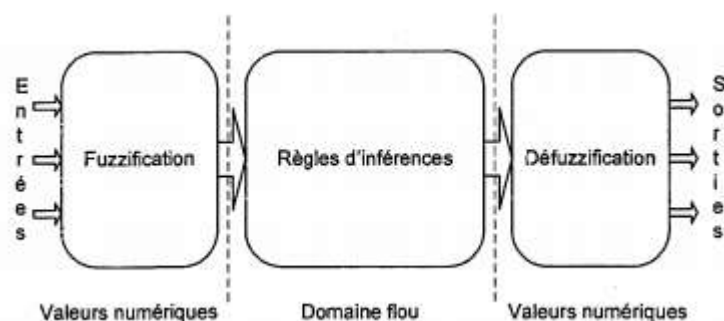


Figure II.1 Les trois phases de la logique floue.

II.5 Variable linguistique

La notion de variable linguistique permet de modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise est inconnue. Une variable linguistique, ou variable floue, est donc une variable dont les valeurs floues appartiennent à des ensembles flous pouvant représenter des mots du langage naturel. Ainsi une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques [20]. Le domaine sur lequel ces termes et ces variables sont définis, constitue l'univers de discours. Le découpage de cet univers de discours par les termes flous est appelé une partition floue. Lorsque l'univers de discours est totalement recouvert par les termes flous, et que pour toutes valeurs, la somme des degrés d'appartenance est égale à 1, on parle alors de partition floue forte. La variable linguistique peut être représentée par un triplet $(x, T(x)U)$ dans lequel x est le nom de la variable linguistique, $T(x)$ l'ensemble des valeurs linguistiques de x et U l'univers de discours. La (figure II.2) illustre un exemple de variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistique: petite, moyenne et grande. [20].

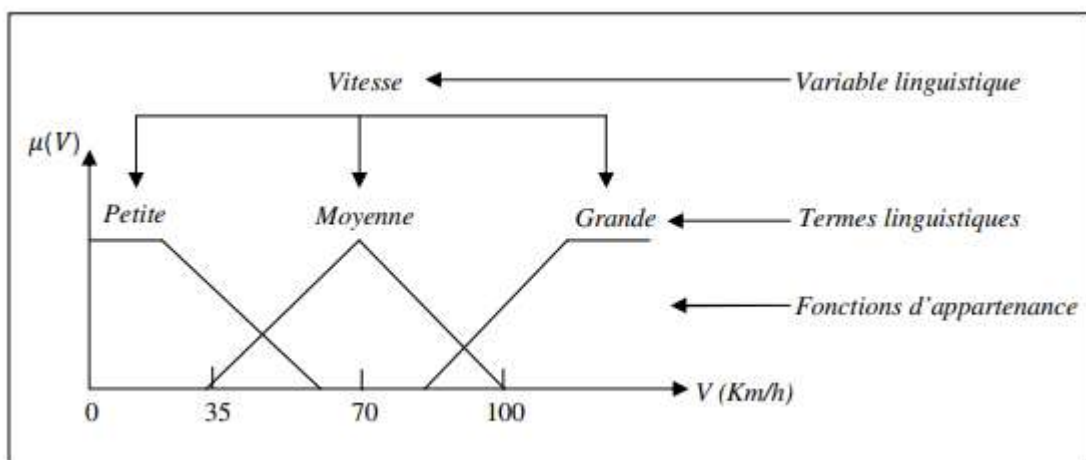


Figure II.2 Variable linguistique.

II.6 Sous-ensemble flou

Nous venons de voir ce que l'on entend par sous-ensemble ou, d'un point de vue formel. Un sous-ensemble A sur un univers de discours U , est représenté comme dans la (figure II.3) à travers sa fonction caractéristique μ_A . Il peut également être décrit par un certain nombre de caractéristiques comme [21].

II.6.1 Son support

$$\text{Support}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (\text{II.3})$$

II.6.2 Sa hauteur

$$\text{Hauteur}(A) = \sup_{x \in U} \{\mu_A(x)\} \quad (\text{II.4})$$

II.6.3 Son noyau

$$\text{Noyau}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{II.5})$$

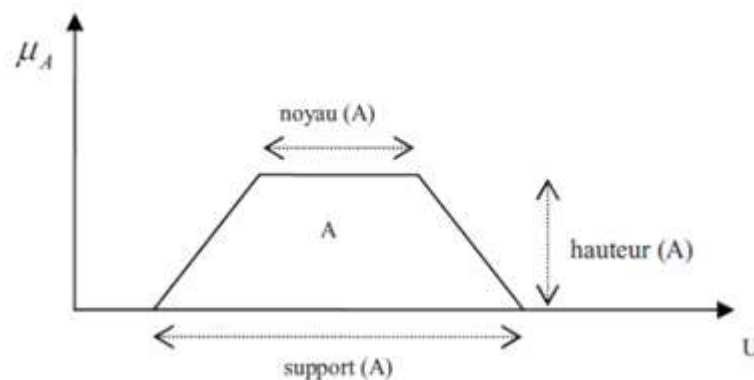


Figure II.3 Représentation d'un sous-ensemble flou et principales caractéristiques.

II.7 Fonction d'appartenance

Soit un ensemble E et un sous-ensemble A de E ($A \subset E$) et x un élément de E appartenant à $(A \in E)$. (Pour illustrer cette caractéristique, on utilise la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ compris entre 0 et 1, qui représente le degré d'appartenance de x à l'ensemble flou A . Le plus souvent, la fonction d'appartenance est déterminée par l'une des fonctions suivantes (figure II.4) : [20]

II.7.1 Fonction triangulaire

Elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$, qui déterminent les coordonnées des trois sommets (figure 1.2-a). [20].

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.6})$$

II.7.2 Fonction trapézoïdale

Elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$, (figure II.4) : [20].

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.7})$$

II.7.3 Fonction gaussienne

Elle est définie par deux paramètres $\{\Omega, m\}$, (figure II.4) : [20].

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma}\right) \quad (\text{II.8})$$

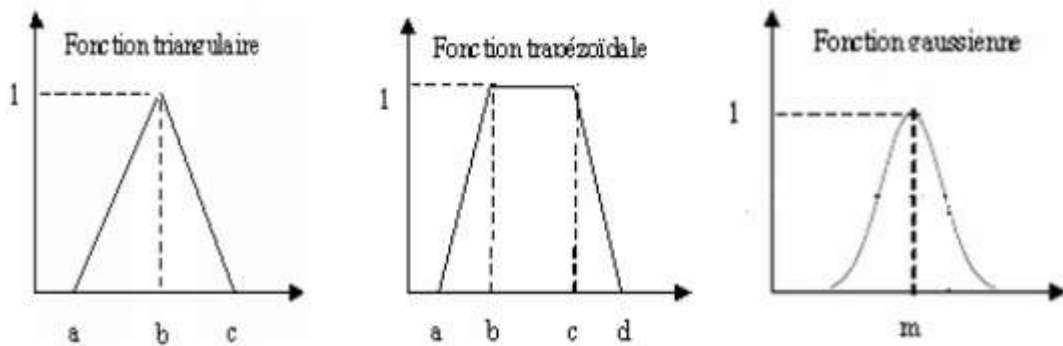


Figure II.4 Formes des fonctions d'appartenance [22].

II.8 Les opérations de la logique floue

Comme dans la théorie des ensembles classiques, on définit l'intersection, l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou, ces relations sont traduites par les opérateurs « et », « ou » et « non » est sont les plus utilisés. Les Figures (II.5), (II.6), (II.7) représentent la réalisation des opérateurs et, ou et non des ensembles flous a et b utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires et sont comparés aux opérateurs booléens correspondants. Soit, $\mu_a(x), \mu_b(x)$ les degrés d'appartenance de l'élément x dans l'univers de discours X (dénommé par $x \in X$) [22].

II.8.1 Opérateur * NON *

Selon la théorie des ensembles, l'ensemble complémentaire

$$c = a \quad (\text{II.9})$$

Est défini par les éléments de x qui n'appartiennent pas à l'ensemble a . Dans le cas de la logique floue, cette définition peut être exprimée par les fonctions d'appartenances de la manière suivante [22].

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_a(x) \quad (\text{II.10})$$

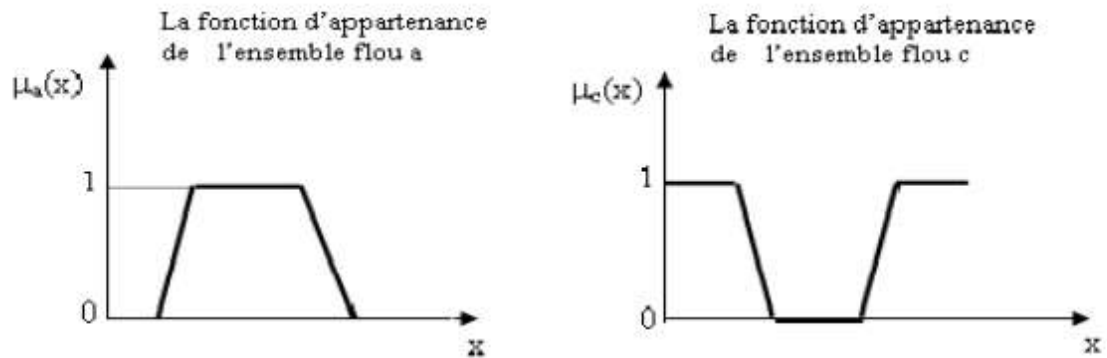


Figure II.5 Opération *NON*.

II.8.2 Opérateur * ET *

L'opérateur « ET » correspond à l'intersection de deux ensembles a et b on écrit :

$$c = a \cap b = a \text{ ET } B \quad (\text{II.11})$$

Dans la logique floue, l'opérateur « ET » est réalisé dans la plupart des cas par la formulation du minimum, appliqué aux fonctions d'appartenance $\mu_a(x)$ et $\mu_b(x)$ des deux ensembles a et b [22].

$$\mu_c(x) = \min[\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad (\text{II.12})$$

On parle alors de l'opérateur minimum, cette opération est représentée à Figure II. 20:

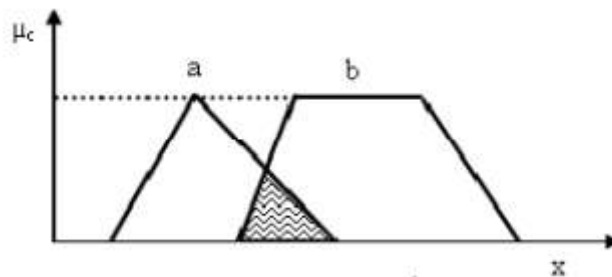


Figure II.6 L'opérateur * ET *, réalisé par la formulation de minimum.

II.8.3 Opérateur * OU *

L'opérateur « OU » correspond à l'union de deux ensembles a et b, on a donc :

$$c = a \cup b = a \text{ OU } b \quad (\text{II.13})$$

La réalisation de l'opérateur ou au niveau de la logique floue se fait en général par la formulation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_a(x)$ et $\mu_b(x)$ des deux ensembles a et b On a donc l'opérateur maximum :

$$\mu_c(x) = \max[\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad (\text{II.14})$$

Cette opération est représentée comme suit: [22].

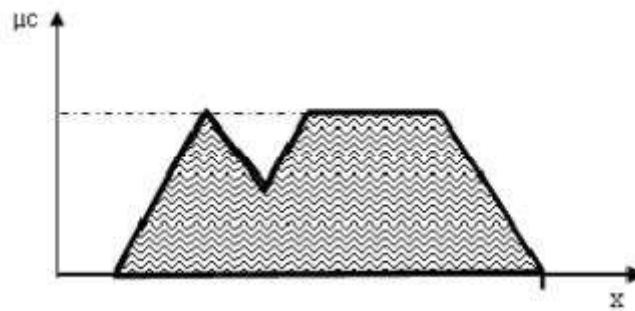


Figure II.7 Opérateur * OU *, réalisé par la formulation du maximum.

II.9 Structure générale de la logique floue

La logique est composée de quatre éléments suivants (Figure II.8) [21].

- interface de fuzzification.
- base de connaissances.
- moteur d'inférence floue
- interface de défuzzification

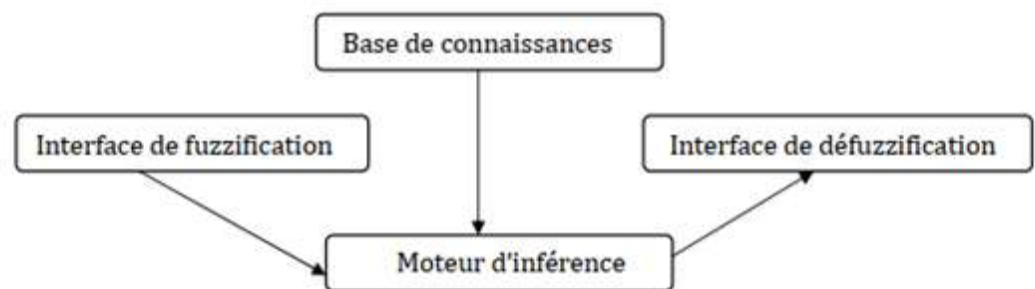


Figure II.8 Structure générale [21].

II.9.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert. Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur appartenant à un univers du discours relativement simple. On peut choisir comme univers du discours un intervalle centré sur zéro $[-c + c]$. Si la mesure initiale x est comprise dans un autre intervalle $[a, b]$, la normalisation est souvent réalisée par transformation linéaire, selon :

$$y = \frac{2c}{b-a} \left[x - \frac{a+b}{2} \right] \quad (\text{II.15})$$

L'univers du discours est ensuite représenté par une variable linguistique, qui comporte un nombre assez restreint de termes (en général trois, cinq ou sept) de façon à limiter le nombre de règles. Enfin, les valeurs normalisées déduites de chacune des entrées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant les variables linguistiques correspondantes [23].

II.9.2 Base de connaissances

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts. Elle comprend la base de données et la base des règles floues.

- La base de données Contient la définition des ensembles flous, les facteurs d'échelle pour la normalisation des ensembles de référence et la partition de l'espace flou d'entrée et sortie.
- La base des règles floues Elle rassemble l'ensemble des règles floues de type « Si-Alors » décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système [21].

$$\begin{aligned} R: & \text{si } x_1 \text{ est } A_1^1 \text{ et.....et } X_n \text{ est } A_n^1 \\ & \text{Alors } \mu_1 \text{ est } B_1 \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

II.9.3 Moteur d'inférence floue

La seconde partie est le moteur d'inférence qui se chargera d'appliquer chacune des règles d'inférences. Ces règles d'inférences représentant les connaissances que l'on a du système dû à l'expertise humaine. Chaque règle générera une commande de sortie [24].

II.9.4 Interface de défuzzification

Comme nous avons vu dans la section précédente, les méthodes d'inférence fournissent un résultat qui est une fonction d'appartenance. Or, la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue, prenant sa valeur dans un intervalle. La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie [23].

a. Défuzzification par centre de gravité

La défuzzification par centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance selon :

$$y_{cg} = \frac{\int y \cdot \mu_{B_{res}}(y) dy}{\int y \cdot B_{res}(y) dy} \quad (\text{II.17})$$

En pratique, on estime le centre de gravité en calculant la moyenne d'un certain nombre de points échantillonnés sur la fonction :

$$y_{cg} = \frac{\sum y_i \mu_{B_{res}}(y_i)}{\sum \mu_{B_{res}}(y_i)} \quad (\text{II.18})$$

Le temps nécessaire au traitement est directement proportionnel au nombre de points retenus pour le calcul de la moyenne. Selon les contraintes fixées par l'application, il y a un compromis à réaliser entre la précision souhaitée et le temps de calcul disponible [23].

b. Défuzzification par centre maximum

Dans cette méthode, la valeur de sortie est estimée par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle pour lequel la fonction d'appartenance est maximale. Cette valeur est fournie par l'expression :

$$y_{cm} = \frac{\inf M + \sup M}{2} \quad (\text{II.19})$$

Dans laquelle M est l'ensemble des points pour lesquels la fonction d'appartenance est maximale :

$$M = \{y \in [-c, c] \mid \mu_{B_{res}}(y) = H(B_{res})\} \quad (\text{II.20})$$

Dans le cas discret, on explore en fait la liste de tous les points pour lesquels la fonction d'appartenance est maximale afin de trouver le plus petit et le plus grand [23].

c. Défuzzification par valeur maximum

Cette méthode ne s'utilise que dans le cas discret. On choisit comme sortie y_m l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{B_{res}}(y)$. Lorsque $\mu_{B_{res}}(y)$ est échantillonnée, on prend la moyenne des abscisses du maximum :

$$y_m = \frac{\sum_{y_i \in M} y_i}{|M|} \quad (\text{II.21})$$

Où M est défini dans l'équation

Tapez une équation ici.

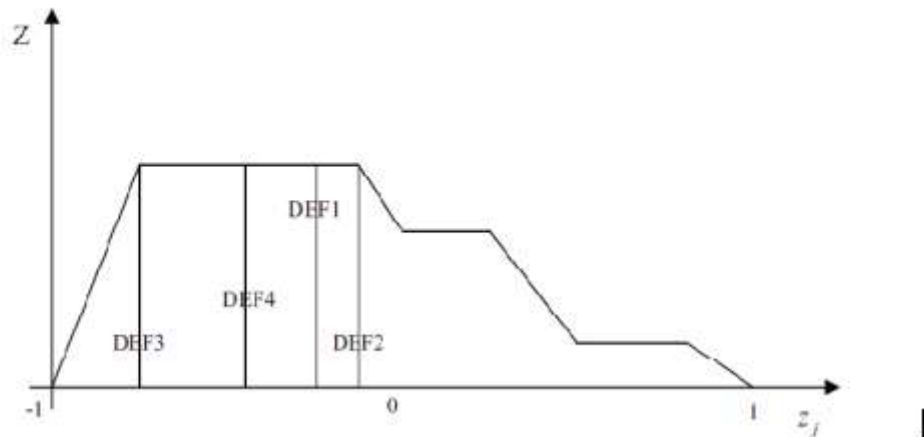


Figure II.9 Différentes méthodes de défuzzification [21].

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait quelques définitions sur la logique floue et quelques généralités sur les bases de la commande floue.

La logique floue a prouvé son efficacité analytique

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1 Introduction

La logique floue est une méthode qui est intégrée dans la plupart des applications actuelles où nous sommes autorisés à étudier et analyser les résultats avec différentes fonctions.

Dans ce chapitre, nous proposons d'utiliser d'un modèle flou pour évaluer les propriétés mécaniques (résistance à la traction et densité) des composites de polychlorure de vinyle (PVC).

III.2 Données expérimentales

Sur la base des données expérimentales recueillies dans le tableau : III.3 obtenues à partir de la référence [2]. Nous suggérons d'utiliser la méthode de simulation basée sur la théorie de la logique floue (Mamdani) par le programme MATLAB pour évaluer les propriétés des composites de polychlorure de vinyle (PVC).

Tableau III.1: Données expérimentales des composites PVC [2].

Essai	pvc vierge (%)	pvc recyclé (%)	CaCO ₃ (%)	DOP (%)	CPW (%)	Taille des particules de CaCO ₃ (μm)	R _m (Mpa)	Densité (g/cm ³)
1	0,196	0,295	0,246	0,246	0,000	5,000	7,156	1,872
2	0,393	0,295	0,196	0,098	0,000	10,000	16,13	1,868
3	0,339	0,143	0,335	0,132	0,033	10,000	24,292	1,696
4	0,339	0,143	0,335	0,165	0,000	5,000	26,958	1,788
5	0,491	0,196	0,196	0,079	0,020	5,000	15,81	1,648
6	0,246	0,295	0,196	0,196	0,049	10,000	10,25	1,466
7	0,491	0,049	0,196	0,196	0,049	10,000	20,192	1,748
8	0,491	0,049	0,196	0,196	0,049	5,000	36,410	1,826
9	0,196	0,295	0,393	0,098	0,000	10,000	16,658	1,494
10	0,196	0,000	0,540	0,246	0,000	5,000	2,502	1,344
11	0,491	0,000	0,246	0,246	0,000	5,000	11,24	1,58
12	0,196	0,295	0,393	0,079	0,020	10,000	12,384	1,602
13	0,491	0,000	0,393	0,098	0,000	5,000	16,814	1,448

14	0,491	0,000	0,246	0,196	0,049	10,000	16,344	1,454
15	0,196	0,295	0,393	0,098	0,000	5,000	15,824	1,678
16	0,196	0,000	0,540	0,246	0,000	10,000	2,190	1,798
17	0,344	0,000	0,540	0,098	0,000	10,000	8,350	1,660
18	0,491	0,049	0,196	0,246	0,000	5,000	12,706	1,620
19	0,196	0,000	0,540	0,196	0,049	10,000	3,458	1,684
20	0,393	0,295	0,196	0,079	0,020	5,000	14,444	1,864
21	0,246	0,295	0,196	0,246	0,000	10,000	10,022	1,796
22	0,196	0,000	0,540	0,196	0,049	5,000	3,676	1,780
23	0,196	0,295	0,393	0,079	0,020	5,000	13,94	1,812
24	0,196	0,295	0,246	0,196	0,049	5,000	10,194	1,292
25	0,196	0,147	0,540	0,098	0,000	5,000	12,376	1,956
26	0,196	0,295	0,246	0,196	0,049	10,000	30,372	1,882
27	0,344	0,000	0,540	0,098	0,000	5,000	8,060	1,758
28	0,491	0,000	0,246	0,246	0,000	10,000	6,438	1,750
29	0,339	0,143	0,335	0,132	0,033	5,000	17,176	1,508
30	0,339	0,143	0,335	0,165	0,000	10,000	16,336	1,682
31	0,491	0,196	0,196	0,098	0,000	5,000	43,244	1,620
32	0,491	0,049	0,196	0,246	0,000	10,000	38,902	1,602
33	0,196	0,147	0,540	0,079	0,020	5,000	16,638	1,490
34	0,246	0,295	0,196	0,246	0,000	5,000	25,452	1,558
35	0,196	0,147	0,540	0,098	0,000	10,000	16,138	1,528
36	0,393	0,295	0,196	0,079	0,020	10,000	18,138	1,592
37	0,491	0,000	0,246	0,196	0,049	5,000	15,368	1,792
38	0,246	0,295	0,196	0,196	0,049	5,000	12,528	1,828
39	0,196	0,147	0,540	0,079	0,020	10,000	8,390	2,070
40	0,491	0,000	0,393	0,079	0,020	10,000	20,46	1,522
41	0,344	0,000	0,540	0,079	0,020	5,000	9,844	1,794
42	0,491	0,196	0,196	0,079	0,020	10,000	15,004	1,680
43	0,393	0,295	0,196	0,098	0,000	5,000	18,182	1,658
44	0,491	0,000	0,393	0,098	0,000	10,000	14,846	1,588
45	0,196	0,295	0,246	0,246	0,000	10,000	15,606	1,576

46	0,491	0,000	0,393	0,079	0,020	5,000	19,186	1,646
47	0,491	0,196	0,196	0,098	0,000	10,000	50,126	1,766
48	0,344	0,000	0,540	0,079	0,020	10,000	8,036	1,798

III.2.1 Système flou

Dans ce système flou nous avons choisi, un système d'inférence flou de type Mamdani pour une type des composites PVC.

Nous utilisons un système flou avec six (06) entrées : pvc vierge, pvc recyclé, CaCO₃, DOP, CPW, Taille des particules de CaCO₃ et deux variables de sortie: la résistance à la traction (R_m), la densité

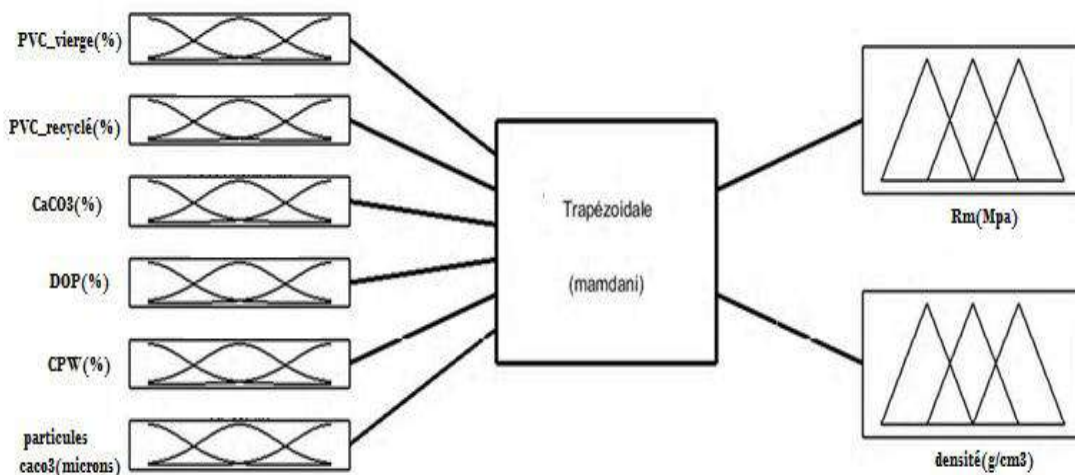


Figure III.I Système flou pour les composites PVC.

III.2.2 Modélisation floue

a. Les variables flous

Dans la construction de notre modèle (les composites PVC) nous avons choisi comme paramètres d'entrée : pvc vierge, pvc recyclé, CaCO₃, dop, cpw, et Taille des particules de CaCO₃; et comme variables de sortie nous avons choisi : la résistance à la traction, densité

Tableau III.2 : Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite PVC

	Valeur Mini	Valeur Max
Les paramètres d'entrée		
PVC vierge (%)	0.196	0.491
PVC recyclé (%)	0	0.295
CaCO ₃ (%)	0.196	0.540
DOP (%)	0.079	0.246
CPW (%)	0	0.046
Taille des particules de CaCO ₃ (μm)	5	10
Les paramètres de sortie		
La résistance à la traction (Rm) (MPa)	2.190	50.126
Densité (g/cm ³)	1.292	2.070

L'ensemble des variables utilisés dans notre étude sont découpée en catégories appelées variables linguistiques. Chaque variable linguistique correspond à un intervalle de donnée numérique.

Les variables linguistiques pour la première variable (pvc vierge) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.2)

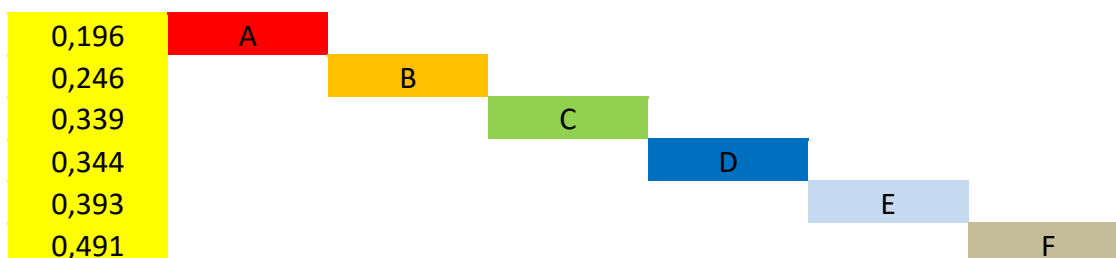


Figure III.2 Variables Linguistiques pour le (pvc vierge).

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (pvc recyclé) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.3)

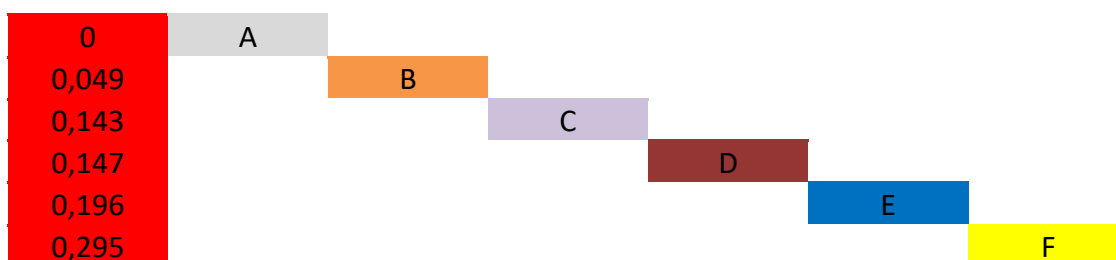


Figure III.3 : Variables Linguistiques pour le (pvc recyclé).

Les variables linguistiques pour la troisième variable (CaCO_3) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.4)

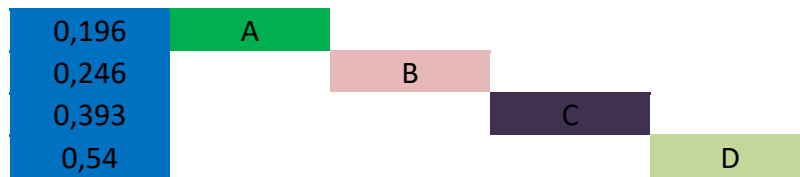


Figure III.4 Variables Linguistiques pour la charge (CaCO_3).

Les variables linguistiques pour la quatrième variable (DOP) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.5)

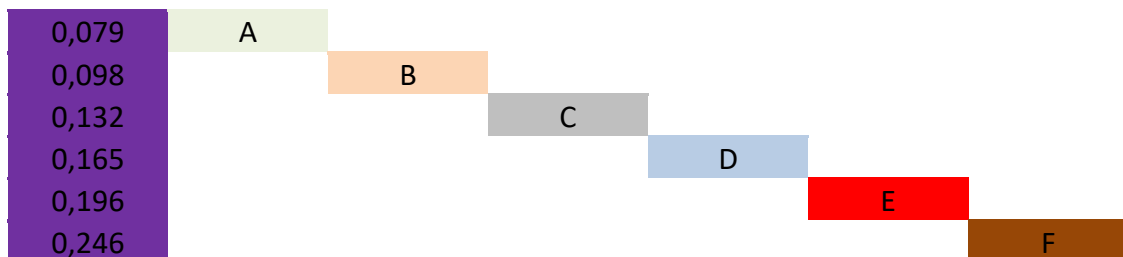


Figure III.5 Variables Linguistiques pour le plastifiant (DOP).

Les variables linguistiques pour la cinquième variable (CPW) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.6)



Figure III.6 Variables Linguistiques pour le plastifiant (CPW).

Les variables linguistiques pour la sixième variable (Taille des particules de CaCO_3) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.7)

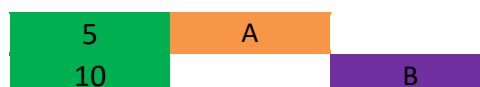


Figure III.7 Variables Linguistiques pour la (Taille des particules de CaCO_3)

Les variables linguistiques pour la première sortie (la résistance à la traction) est choisie comme il est indiqué dans la figure (III.8)

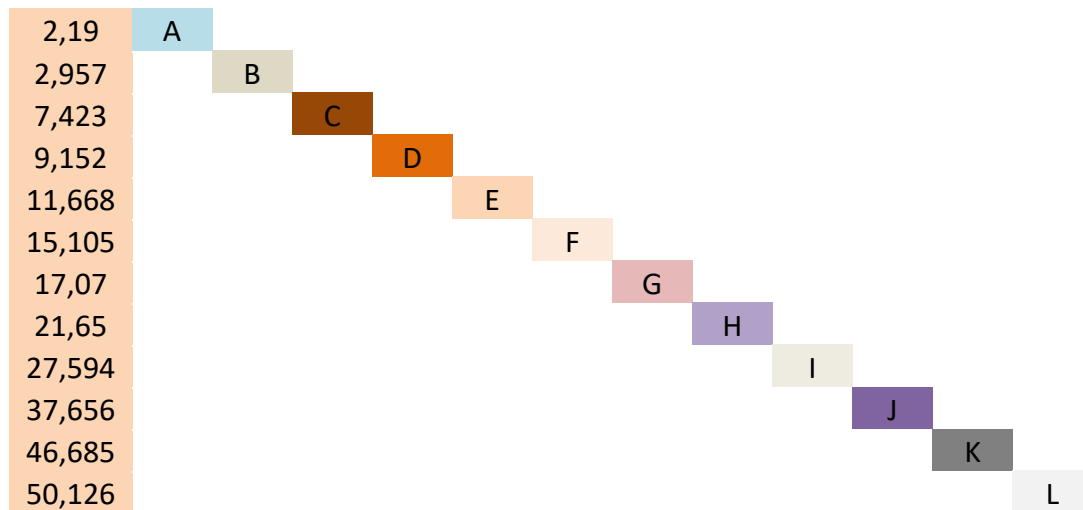


Figure III.8 Variables Linguistiques pour la résistance à la traction.

Les variables linguistiques pour la deuxième sortie (la densité) est choisie comme il est indiqué dans la figure (III.9)

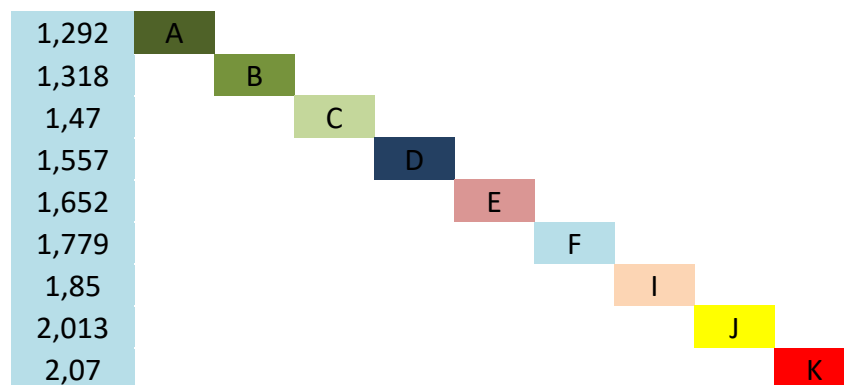


Figure III.9 Variables Linguistiques pour la (la densité)

b. Les sous-ensembles flous

Les sous-ensembles flous (ou parties floues) ont été introduits afin de modéliser la représentation humaine des connaissances, et ainsi améliorer les performances des systèmes de décision qui utilisent cette modélisation.

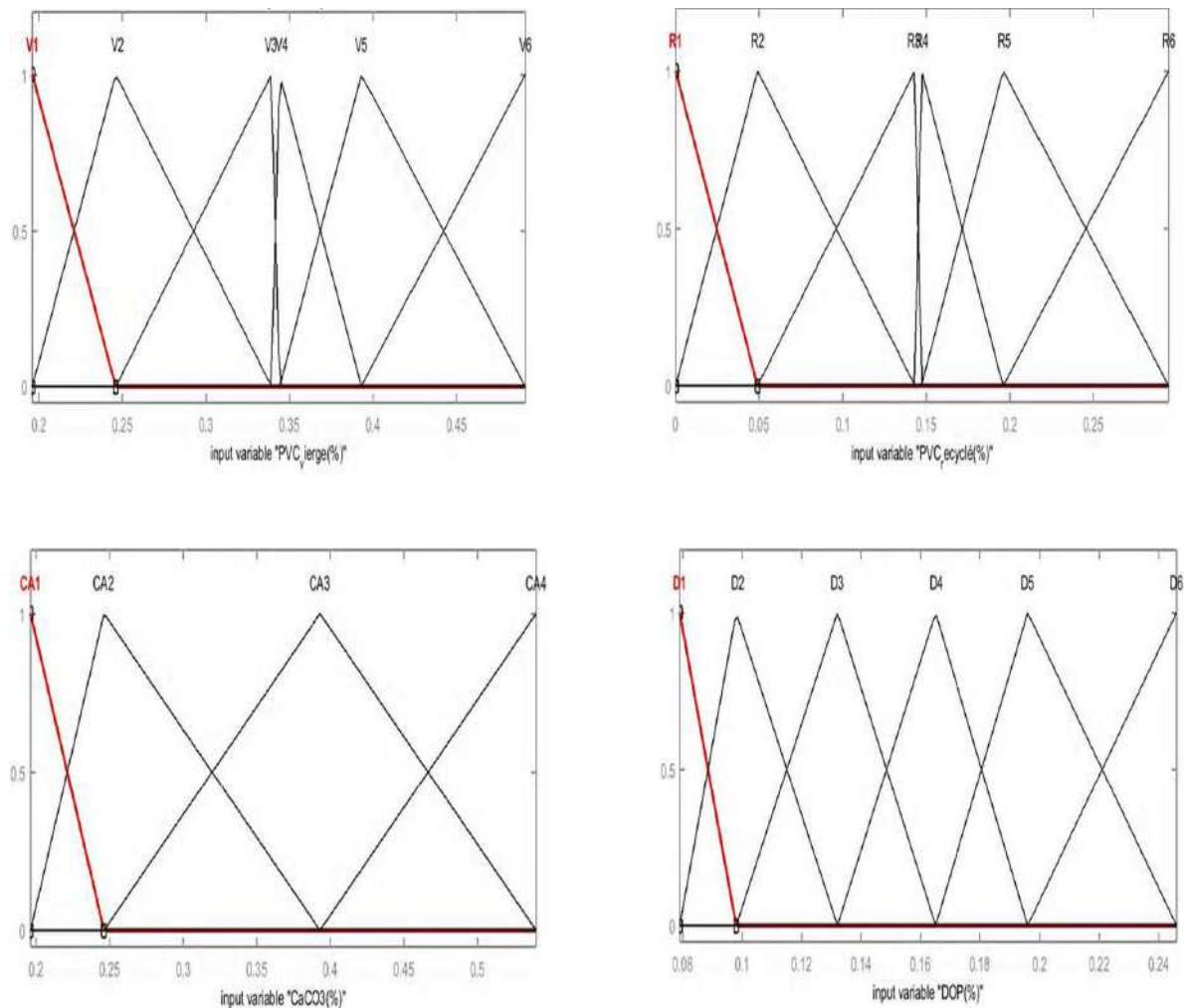
Les sous-ensembles flous sont utilisés soit pour modéliser l'incertitude et l'imprécision, soit pour représenter des informations précises sous forme lexicale assimilable par un système expert.

Un ensemble flou est défini à sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notation de fonction caractéristique.

Les fonctions d'appartenance se présentent sous différentes formes, y compris triangulaire, trapézoïdale, gaussienne et sigmoïde. Dans la présente étude, les fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale ont été utilisées pour les paramètres d'entrée et le paramètre de sortie.

Les fonctions d'appartenance utilisées pour les paramètres d'entrées et sortie sont représentées dans les figures : de III.10, III.11.

Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires



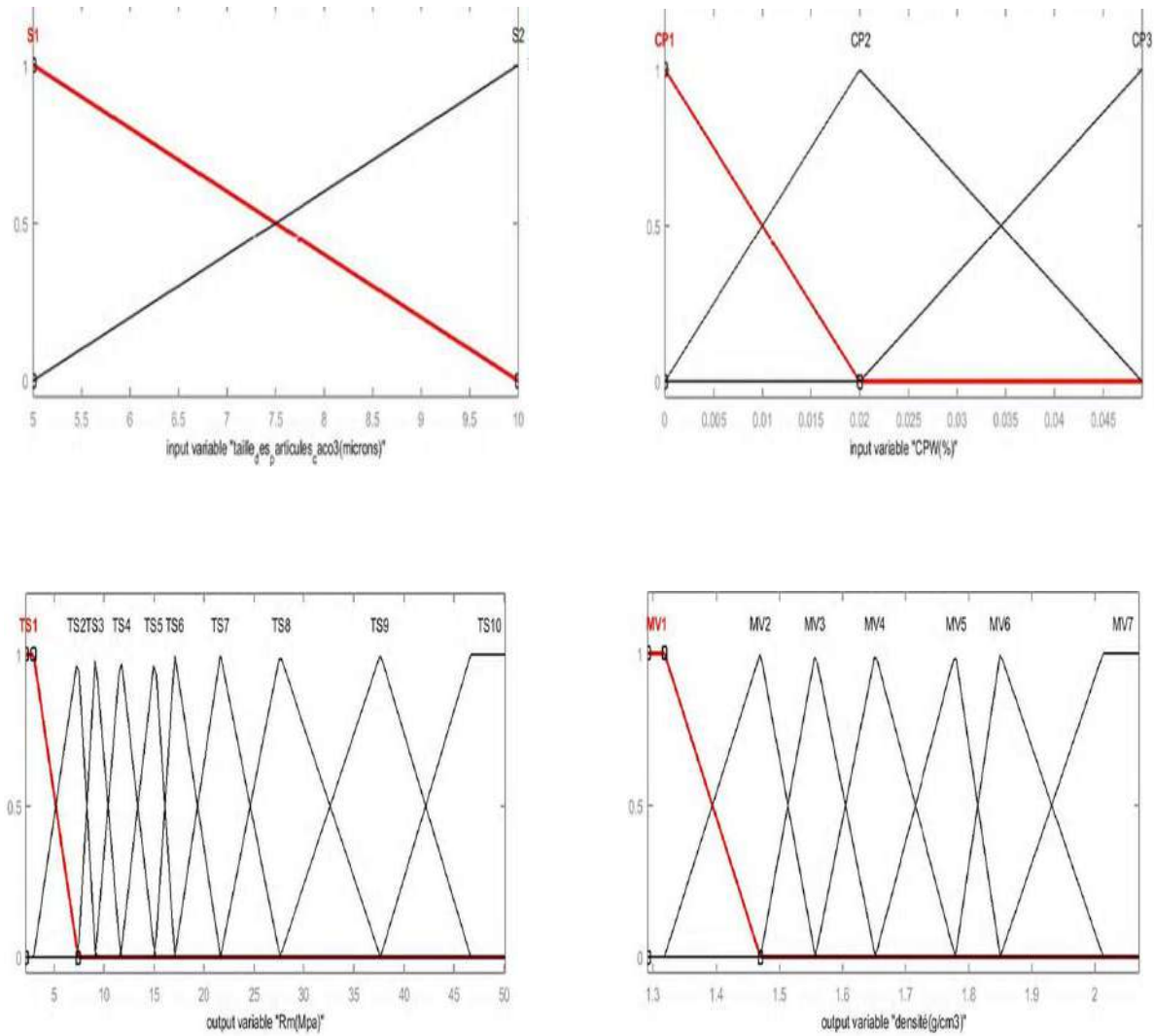
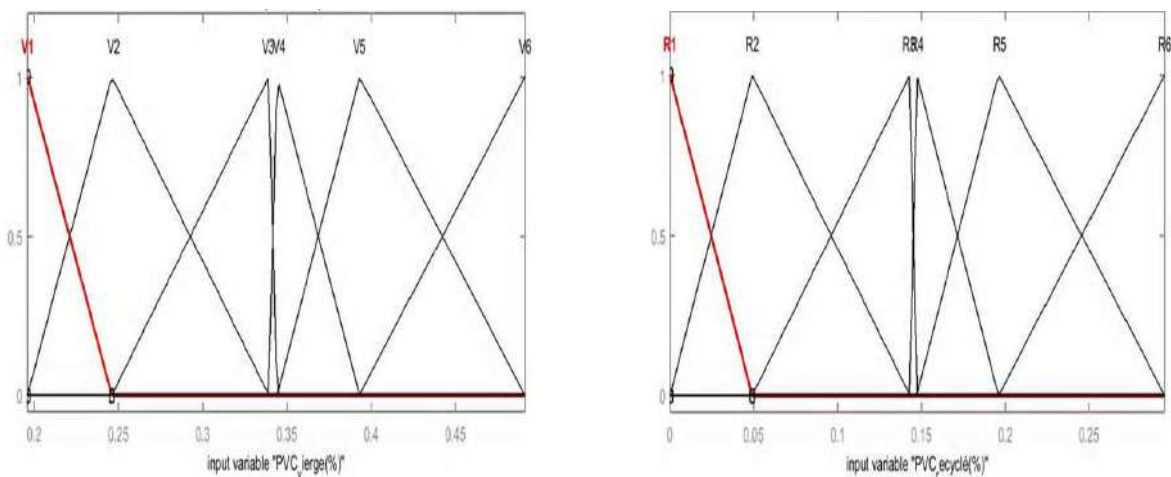


Figure III.10 : Les fonctions d'appartenance triangulaires.

Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdales



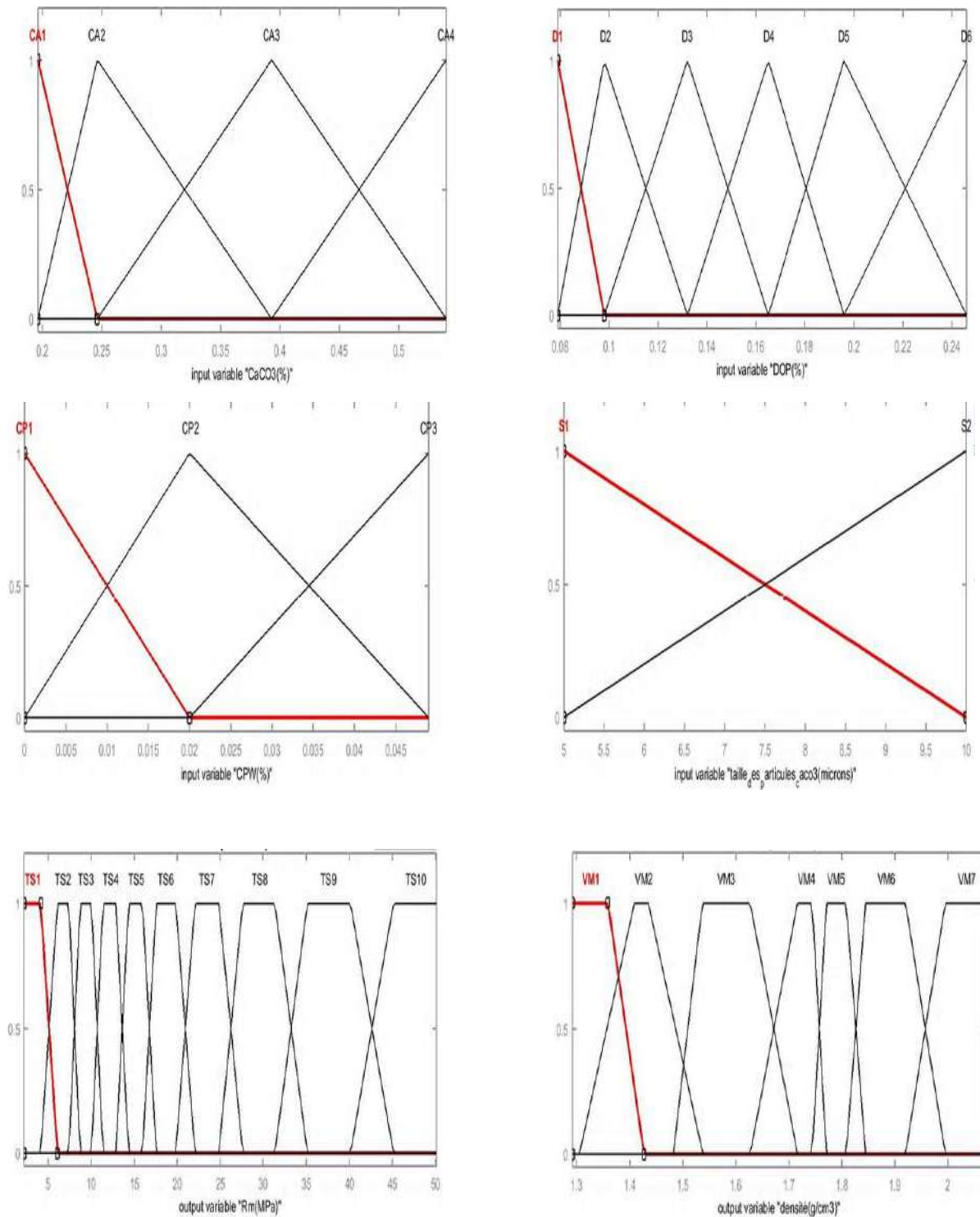


Figure III.11 Les fonctions d'appartenance trapézoïdale.

III.3 Les règles floues

Quarante-huit (48) règles floues ont été établies selon les fonctions des conditions expérimentales indiquées dans le tableau (III.1) et (III.2) En adhérant au processus de composition maximum-minimum, la logique floue de ces règles a produit une sortie floue.

Chaque règle prend la forme suivante :

Si V est (variable linguistique) et R est (variable linguistique) et Ca est (variable linguistique) et D est (variable linguistique) et CP est (variable linguistique) et S (variable linguistique) Alors TS est (variable linguistique) et MV est (variable linguistique).

L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau III.3

Tableau III.3 : Les règles floues pour les composites PVC

Essai	pvc vierge (%)	pvc recyclé (%)	CaCO ₃ (%)	DOP (%)	CPW (%)	Taille des particules de CaCO ₃ (μm)	R _m (Mpa)	Densité (g/cm ³)
1	V1	R6	Ca2	D6	CP1	S1	TS2	MV6
2	V5	R6	Ca1	D2	CP1	S2	TS6	MV6
3	V3	R3	Ca3	D3	CP3	S2	TS7	MV4
4	V3	R3	Ca3	D4	CP1	S1	TS8	MV5
5	V6	R5	Ca1	D1	CP2	S1	TS5	MV4
6	V2	R6	Ca1	D5	CP3	S2	TS4	MV2
7	V6	R2	Ca1	D5	CP3	S2	TS7	MV5
8	V6	R2	Ca1	D5	CP3	S1	TS9	MV6
9	V1	R6	Ca3	D2	CP1	S2	TS6	MV2
10	V1	R1	Ca4	D6	CP1	S1	TS1	MV1
11	V6	R1	Ca2	D6	CP1	S1	TS4	MV3
12	V1	R6	Ca3	D1	CP2	S2	TS4	MV4
13	V6	R1	Ca3	D2	CP1	S1	TS6	MV2
14	V6	R1	Ca2	D5	CP3	S2	TS6	MV2
15	V1	R6	Ca3	D2	CP1	S1	TS5	MV4
16	V1	R1	Ca4	D6	CP1	S2	TS1	MV5
17	V4	R1	Ca4	D2	CP1	S2	TS3	MV4
18	V6	R2	Ca1	D6	CP1	S1	TS4	MV4
19	V1	R1	Ca4	D5	CP3	S2	TS1	MV4
20	V5	R6	Ca1	D1	CP2	S1	TS5	MV6
21	V2	R6	Ca1	D6	CP1	S2	TS3	MV5

22	V1	R1	Ca4	D5	CP3	S1	TS1	MV5
23	V1	R6	Ca3	D1	CP2	S1	TS5	MV6
24	V1	R6	Ca2	D5	CP3	S1	TS4	MV1
25	V1	R4	Ca4	D2	CP1	S1	TS4	MV7
26	V1	R6	Ca2	D5	CP3	S2	TS8	MV6
27	V4	R1	Ca4	D2	CP1	S1	TS2	MV5
28	V6	R1	Ca2	D6	CP1	S2	TS2	MV5
29	V3	R3	Ca3	D3	CP3	S1	TS6	MV3
30	V3	R3	Ca3	D4	CP1	S2	TS6	MV4
31	V6	R5	Ca1	D2	CP1	S1	TS10	MV4
32	V6	R2	Ca1	D6	CP1	S2	TS9	MV4
33	V1	R4	Ca4	D1	CP2	S1	TS6	MV2
34	V2	R6	Ca1	D6	CP1	S1	TS8	MV3
35	V1	R4	Ca4	D2	CP1	S2	TS6	MV3
36	V5	R6	Ca1	D1	CP2	S2	TS6	MV3
37	V6	R1	Ca2	D5	CP3	S1	TS5	MV5
38	V2	R6	Ca1	D5	CP3	S1	TS4	MV6
39	V1	R4	Ca4	D1	CP2	S2	TS3	MV7
40	V6	R1	Ca3	D1	CP2	S2	TS7	MV3
41	V4	R1	Ca4	D1	CP2	S1	TS3	MV5
42	V6	R5	Ca1	D1	CP2	S2	TS5	MV4
43	V5	R6	Ca1	D2	CP1	S1	TS6	MV4
44	V6	R1	Ca3	D2	CP1	S2	TS5	MV3
45	V1	R6	Ca2	D6	CP1	S2	TS5	MV3
46	V6	R1	Ca3	D1	CP2	S1	TS6	MV4
47	V6	R5	Ca1	D2	CP1	S2	TS10	MV5
48	V4	R1	Ca4	D1	CP2	S2	TS2	MV5

III.4 Résultats et discussion

Les résultats ont été obtenus par défuzzification. L'étape de la défuzzification consiste à convertir ces valeurs floues en variables réelles.

III.4.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou

Le pourcentage d'erreurs est obtenu en divisant la différence absolue entre la valeur mesurée et la valeur prédiction par la valeur mesurée comme indiqué par l'équation III.1

$$e_i = \left(\frac{|V_{ex} - V_p|}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (\text{III.1})$$

La précision est calculée en trouvant l'approchement de la valeur prédite à la valeur mesurée. Dans l'équation III.2, A est la précision du modèle et N est le nombre total de jeux de données testés. La précision du modèle est la précision individuelle moyenne

$$A = \frac{1}{N} \sum \left[1 - \frac{|V_{ex} - V_p|}{V_{ex}} \right] \times 100 \quad (\text{III.2})$$

III.4.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales

La comparaison entre les résultats obtenus en utilisant des fonctions d'appartenance: triangulaire et trapézoïdale nous à permet de choisir le type de fonctions la plus approprié de notre problème.

Les figures ci-dessous illustrent une comparaison directe entre les résultats obtenus avec les deux types de fonctions d'appartenance.

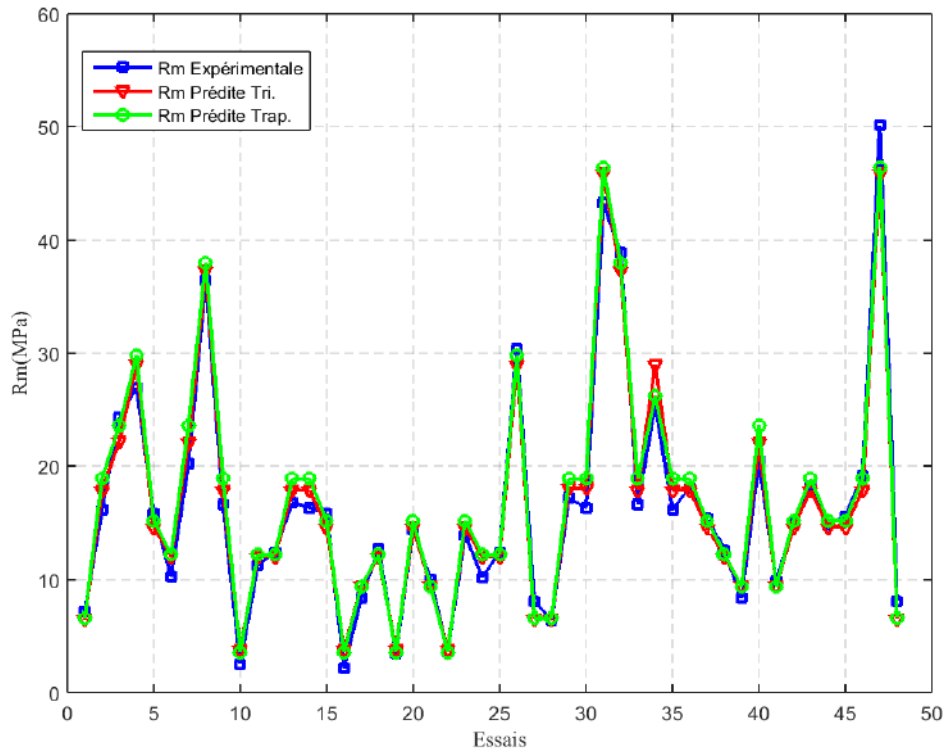


Figure III.12 Variation de la résistance à la traction (R_m) (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.

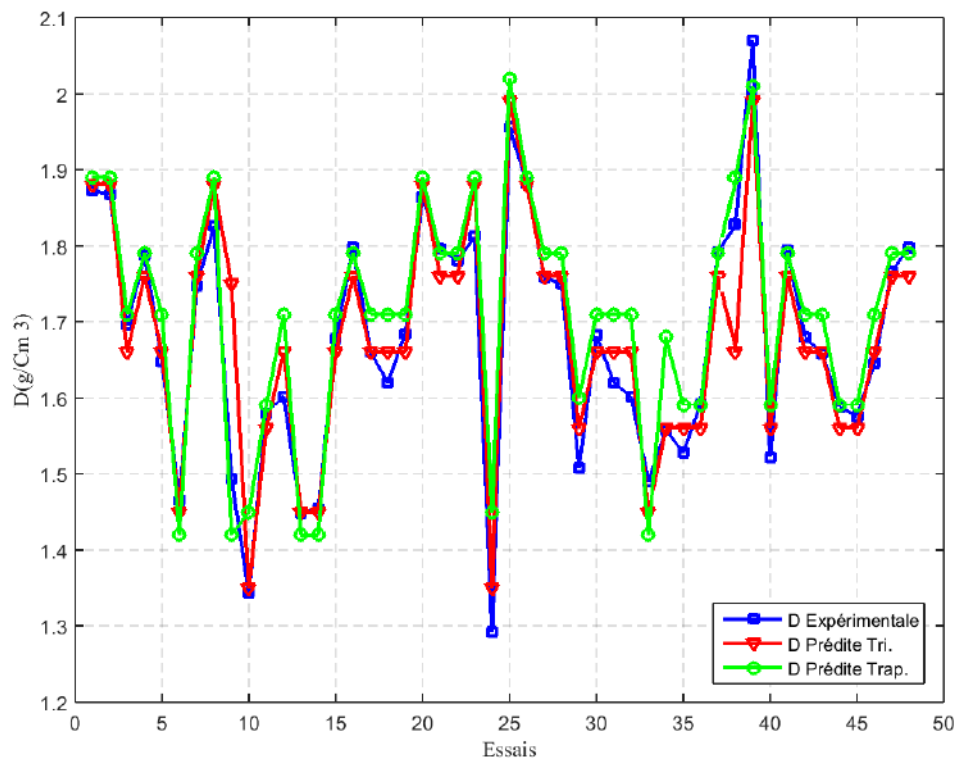


Figure III.13 Variation de la densité (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.

Les figures (III.12) et (III. 13) montrent que la variation des deux sortie en utilisant les deux types de fonctions d'appartenance est presque la même. Donc, cette représentation ne nous permettons pas de choisir entre les deux types de fonctions.

Pour faire ce choix nous proposons d'utiliser la précision pour définir les résultats les plus approchés aux résultats expérimentaux.

Donc les résultats proches aux résultats expérimentaux sont celles obtenues avec des fonctions d'appartenance triangulaires.

Les résultats que nous les présentons dans le reste du manuscrit, nous les avons acquises à l'aide des fonctions d'appartenance triangulaires.

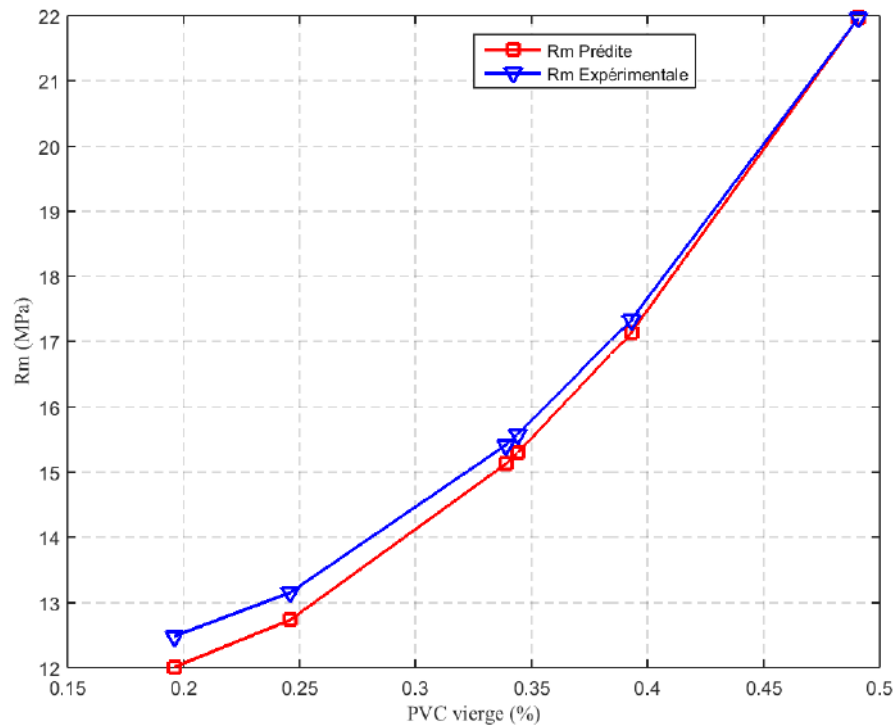
Le tableau III.4 regroupe l'ensemble des résultats obtenus par notre système flou.

Tableau III.4 : Les résultats du système flou pour les composites PVC.

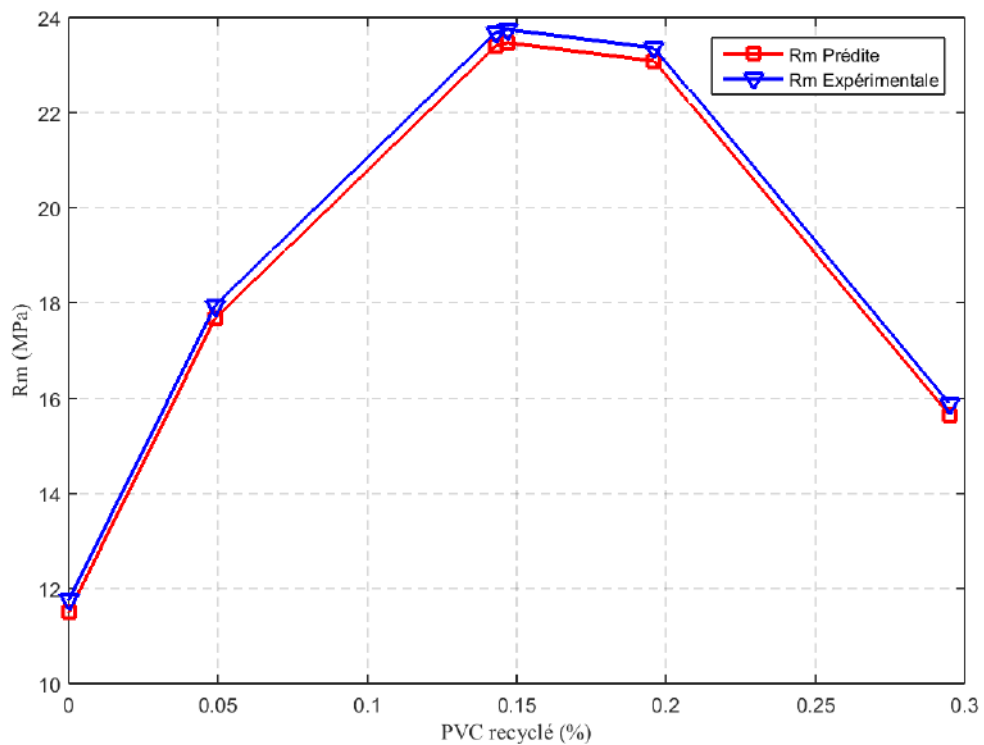
Essai	R _m (exp)	R _m (p)	Erreur%	Précision%	Densité (exp)	Densité (p)	Erreur%	Précision%
1	7,156	6,52	8,8876467	91,112353	1,872	1,88	0,4273504	99,57265
2	16,13	17,9	10,973342	89,026658	1,868	1,88	0,6423983	99,357602
3	24,29	22,2	8,6118887	91,388111	1,696	1,66	2,1226415	97,877358
4	26,96	29,1	7,9456933	92,054307	1,788	1,76	1,5659955	98,434004
5	15,81	14,6	7,6533839	92,346616	1,648	1,66	0,7281553	99,271845
6	10,25	12	17,073171	82,926829	1,466	1,45	1,0914052	98,908595
7	20,19	22,1	9,4492868	90,550713	1,748	1,76	0,6864989	99,313501
8	36,41	37,3	2,4443834	97,555617	1,826	1,88	2,9572837	97,042716
9	16,66	17,9	7,4558771	92,544123	1,494	1,75	17,135207	82,864793
10	2,502	3,83	53,077538	46,922462	1,344	1,35	0,4464286	99,553571
11	11,24	12	6,7615658	93,238434	1,58	1,56	1,2658228	98,734177
12	12,38	12	3,1007752	96,899225	1,602	1,66	3,6204744	96,379526
13	16,81	17,9	6,4589033	93,541097	1,448	1,45	0,1381215	99,861878
14	16,34	17,9	9,5203133	90,479687	1,454	1,45	0,2751032	99,724897
15	15,82	14,6	7,7350859	92,264914	1,678	1,66	1,0727056	98,927294
16	2,19	3,83	74,885845	25,114155	1,798	1,76	2,1134594	97,886541
17	8,35	9,42	12,814371	87,185629	1,66	1,66	0	100
18	12,71	12	5,55643	94,44357	1,62	1,66	2,4691358	97,530864
19	3,458	3,83	10,757663	89,242337	1,684	1,66	1,4251781	98,574822

20	14,44	14,6	1,0800332	98,919967	1,864	1,88	0,8583691	99,141631
21	10,02	9,42	6,0067851	93,993215	1,796	1,76	2,0044543	97,995546
22	3,676	3,83	4,1893362	95,810664	1,78	1,76	1,1235955	98,876404
23	13,94	14,6	4,7345768	95,265423	1,812	1,88	3,7527594	96,247241
24	10,19	12	17,716304	82,283696	1,292	1,35	4,4891641	95,510836
25	12,38	12	3,0381383	96,961862	1,956	1,99	1,7382413	98,261759
26	30,37	29	4,5173186	95,482681	1,882	1,88	0,1062699	99,89373
27	8,06	6,52	19,1067	80,8933	1,758	1,76	0,1137656	99,886234
28	6,438	6,52	1,2736875	98,726313	1,75	1,76	0,5714286	99,428571
29	17,18	18,1	5,3795994	94,620401	1,508	1,56	3,4482759	96,551724
30	16,34	18,1	10,798237	89,201763	1,682	1,66	1,3079667	98,692033
31	43,24	45,9	6,1418925	93,858107	1,62	1,66	2,4691358	97,530864
32	38,9	37,3	4,1180402	95,88196	1,602	1,66	3,6204744	96,379526
33	16,64	17,9	7,5850463	92,414954	1,49	1,45	2,6845638	97,315436
34	25,45	29	13,939965	86,060035	1,558	1,56	0,1283697	99,87163
35	16,14	17,9	10,918329	89,081671	1,528	1,56	2,0942408	97,905759
36	18,14	17,9	1,3121623	98,687838	1,592	1,56	2,0100503	97,98995
37	15,37	14,6	4,9973972	95,002603	1,792	1,76	1,7857143	98,214286
38	12,53	12	4,2145594	95,785441	1,828	1,66	9,190372	90,809628
39	8,39	9,42	12,27652	87,72348	2,07	1,99	3,8647343	96,135266
40	20,46	22,1	8,0156403	91,98436	1,522	1,56	2,4967148	97,503285
41	9,844	9,42	4,3071922	95,692808	1,794	1,76	1,8952062	98,104794
42	15	14,6	2,6926153	97,307385	1,68	1,66	1,1904762	98,809524
43	18,18	17,9	1,5509845	98,449016	1,658	1,66	0,1206273	99,879373
44	14,85	14,6	1,657012	98,342988	1,588	1,56	1,7632242	98,236776
45	15,61	14,6	6,4462386	93,553761	1,576	1,56	1,0152284	98,984772
46	19,19	17,9	6,7028041	93,297196	1,646	1,66	0,8505468	99,149453
47	50,13	45,9	8,4307545	91,569246	1,766	1,76	0,3397508	99,660249
48	8,036	6,52	18,865107	81,134893	1,798	1,76	2,1134594	97,886541
La précision = 90,142164%				La précision = 97,93%				

III.4.3 Représentation schématique des résultats



(a)



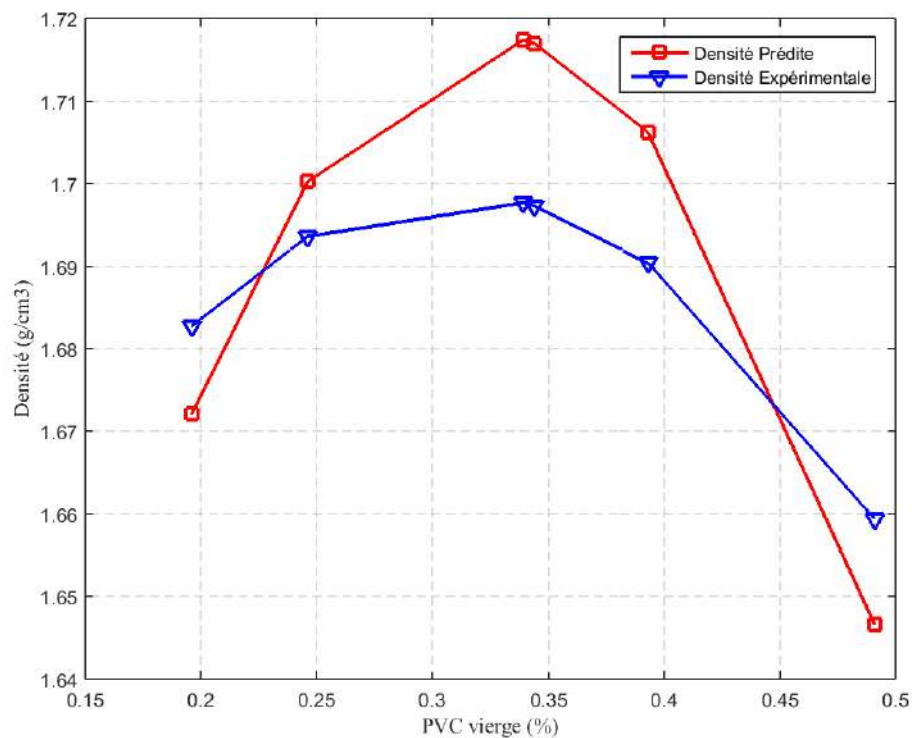
(b)

Figure III.14 les courbes en deux dimensions de la variation de la résistance à la traction en fonction: (a) de pvc vierge et (b) de pvc recyclé.

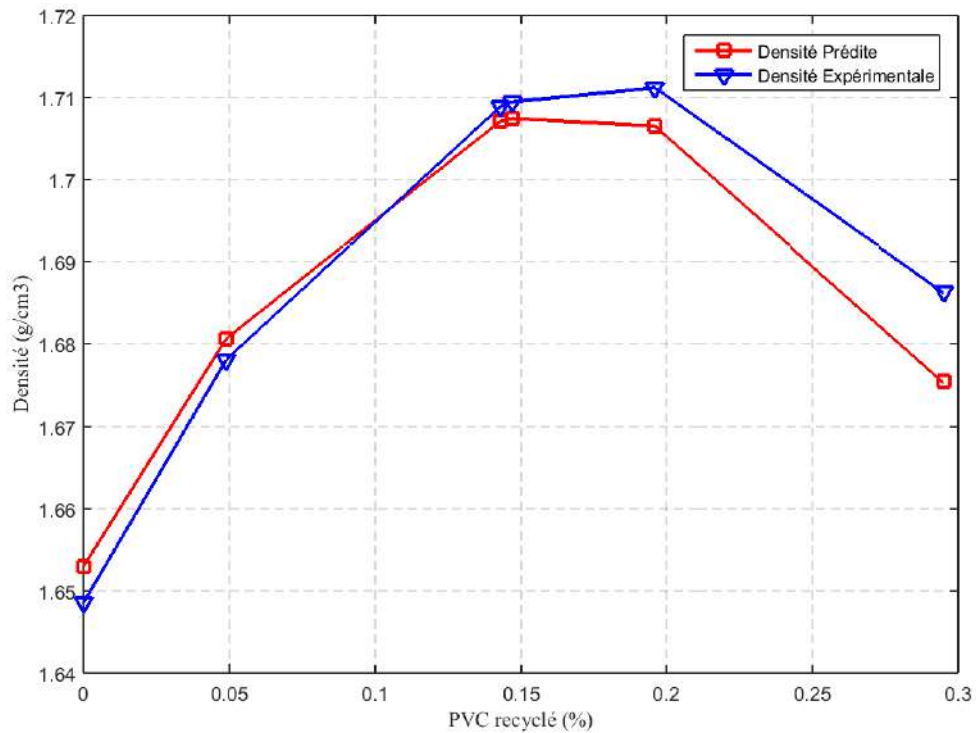
La figure (III.14) représente la variation de la résistance à la traction en fonction de pvc vierge (a) et de pvc recyclé(b).

L'analyse de cette figure (III.14) (a) montre que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation du PVC vierge, donc on peut dire que les composites de PVC ont gagné la propriété de ductilité et deviennent faciles à diriger et à manipuler.

L'analyse de cette figure (III.14) (b) montre que la résistance à la traction augmente jusqu'à une valeur maximale (24 MPa), suivie par une diminution, due à l'oxydation de pvc recyclé



(c)



(d)

Figure III.15 les courbes en deux dimensions de la variation de la densité en fonction: (c) de pvc vierge et (d) de pvc recyclé.

La figure (III.15) représente la variation de la densité en fonction de pvc vierge (c) et de pvc recyclé (d).

L'analyse de ces courbes (c) et (d) montre que la densité du composites de PVC est proche, bien que les pourcentages ajoutées de PVC vierge et de PVC recyclé sont différentes, et cela dû à la légèreté du PVC lui-même.

III.4.4 Validation des résultats

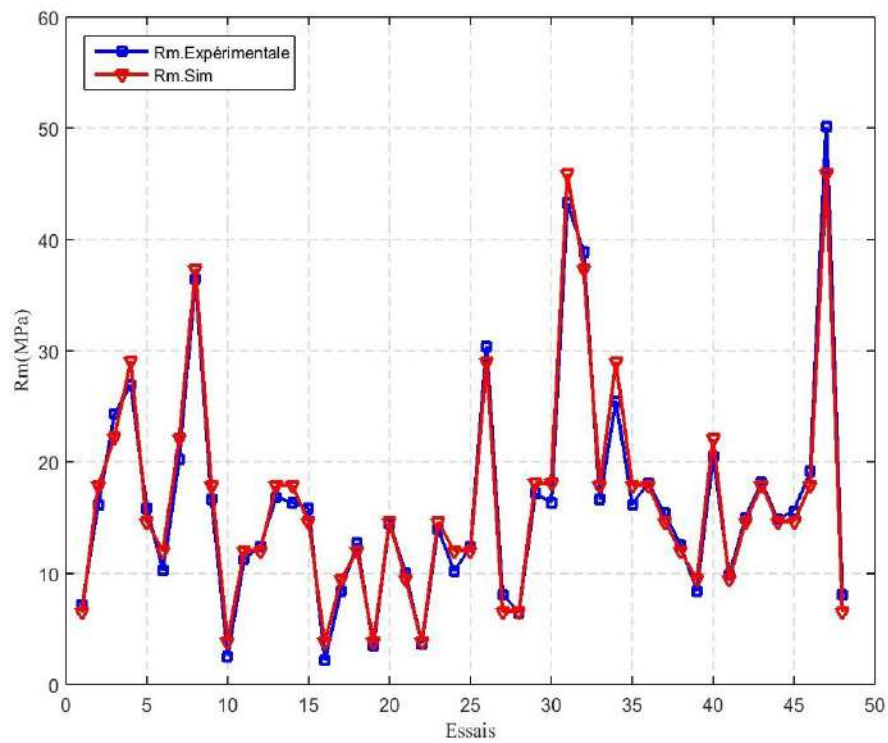


Figure III.16 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux de la résistance à la traction des composites de PVC.

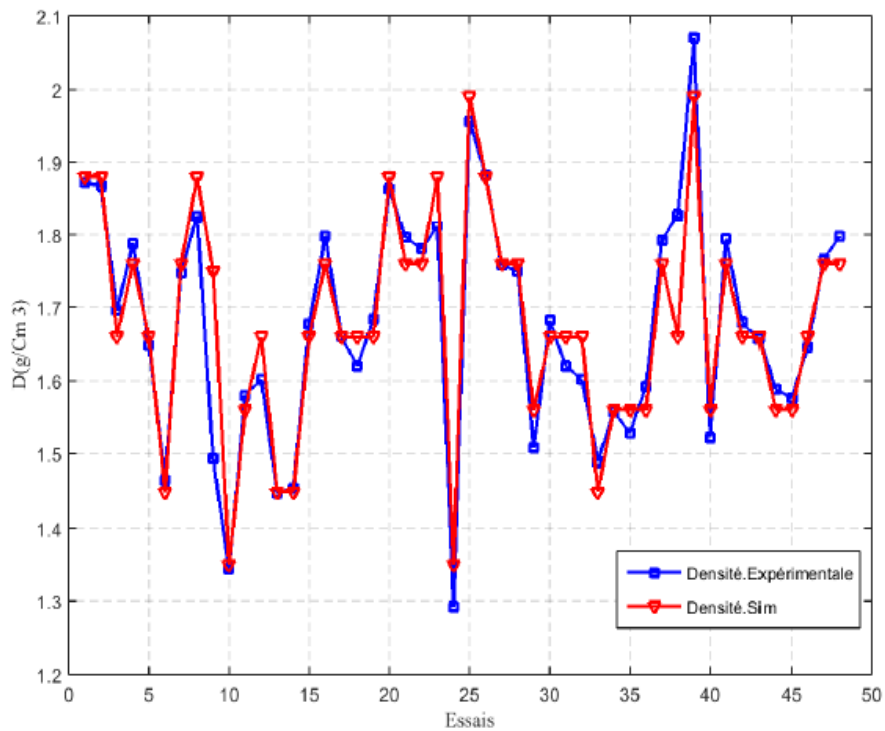


Figure III.17 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux de la densité des composites de PVC.

Les figures III.16 et III.17 comparent les prédictions du modèle de logique floue avec les résultats du taux de la résistance à la traction et de la densité des composites de PVC obtenus expérimentalement. Les figures III.16 et III.17 montrent que le modèle proposé est capable de prédire avec précision la résistance a la traction et la densité des composites de PVC. La concordance entre les valeurs prédites et expérimentales indique que le modèle de logique floue est une solution efficace qui peut être utilisée pour prédire et évaluer les valeurs de la résistance a la traction et de la densité des composites de PVC pour une plage spécifique de paramètres.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développée un modèle floue pour évaluer les propriétés des composites de PVC. Les valeurs prédites sont en bon accord avec les valeurs expérimentales réelles avec une précision de 90,14 % pour la résistance à la traction et de 97,93 % pour la densité

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est évaluer les propriétés des composites de polychlorure de vinyle (PVC)

L'étude que nous avons menés nous a permis de conclure que :

- Le pvc recyclé et le pvc vierge joue un rôle impératif sur les propriétés des composites de polychlorure de vinyle (PVC).
- le modèle floue, élaboré au cours de cette étude, permet d'évaluer les propriétés des composites de polychlorure de vinyle.
- Les résultats obtenus par le modèle floue ont été validés par une étude comparative avec des résultats expérimentaux
- Les valeurs attendues de la densité et de la résistance à la traction correspondent aux valeurs expérimentales réelles avec une précision de 90,14% pour la Résistance à la traction et de 97,93% pour la densité du composites.

Bibliographie

- [1]. <https://oxoplast.com/en/pvc-the-oldest-plastic-material-with-a-wide-range-of-applications/>
- [2]. S. Altarazi, M. Ammouri, A. Hijazi, Artificial neural network modeling to evaluate polyvinylchloride composites' properties, Mechanical Engineering Department, German Jordanian University, Amman, Jordan, 2018
- [3]. D. Anne, étude in situ, par spectroscopie infrarouge en mode ATR, des premières étapes de la formation d'un biofilm de Pseudomonas fluorescents et de sa réponse aux variations de la quantité de carbone organique dissous : application à la détection précoce du changement de la qualité microbiologique d'une eau de distribution, thèse de doctorat, l'université Henri Poincaré, Nancy, 15 novembre 2007
- [4]. P.Weiss, La chimie des polymères, Université médicale virtuelle francophone - 2009-2010
- [5]. R. Rezgui, D. Rezgui, Influence des fibres naturelles sur les propriétés mécaniques et dynamiques des composites à base de PVC (cas DPLF- noix d'olives), Université Mohamed Khider de Biskra, 04 juillet 2019
- [6]. http://colleges.ac-rouen.fr/signoret/IMG/pdf/differents_plastiques.pdf
- [7]. A. Atmani, Comportement mécanique en traction monotone d'un polymère associé au carbonate de calcium (pehd 5502/caco3). Université badji Mokhtar Annaba. Année : 2016/2017
- [8]. Groupe de Travail PVC, Le PVC en "Questions", Janvier 1998
- [9]. Z. Ruska, G. Patrice, S. Christian, C. Jean-Jacques, poly (chlorure de vinyle) ou pvc, date de publication : 10 juil. 2007
- [10]. H. Boulahia, "étude du comportement physico mécanique de nouveaux bio composites poudre de liège – pvc "; université m'Hamed bougara-boumerdes ; année universitaire 2015/2016
- [11]. livre, oui, c'est du pvc !, membres de pvc-info, mai 2006, vzw pvc-info belgium asbl
- [12]. (<https://www.lesmatériaux.fr>), les avantages et inconvénient du pvc - aménagez votre maison simplement, 12/03/2021
- [13]. F.Doubakh, étude de l'influence de la concentration du stabilisant Ca/Zn sur les propriétés du pvc, mémoire master, université Mohamed khider – Biskra, promotion juin 2016
- [14]. M.Marzano, P. celle, les matériaux composites, ANFA / Édition 2014

-
- [15]. A.Parikh, U.Chudasama, metal (IV) tungstates as solid acid catalysts for the synthesis of phthalate diester – dioctyl phthalate (DOP), University of Baroda, India, 2003
- [16]. Chlorinated paraffin wax (cpw) manufacturing. Productin of chlorinated paraffin plasticizers , www.entrepreneurindia.com
- [17]. S. ISADOUNENE, S. KHALIFI, Effet d'Agents Compatibilisants sur les Propriétés des Composites PVC/Farine de Bois, Université A. MIRA – BEJAIA, Juin 2013
- [18]. M. Frederic, application de la logique floue dans la commande des machines synchrones à aimants permanents, Université de Moncton, juillet 2007
- [19]. L. Baghli, Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques. Energie électrique. Université Henri Poincaré - Nancy I, 1999. Français
- [20]. N. Talbi, Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Non linéaires, Université Constantine 1, 25 /02 / 2014
- [21]. S. Doudou, Approche floue pour la commande des systèmes non linéaires non affines, Universite ferhat abbas-setif, 2008
- [22]. S. Belhouane, Étude et simulation d'une régulation thermique par la logique floue, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Promotion 2013 – 2014
- [23]. D. Mokeddem, Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques, Thèse Doctorat, Sciences en Electronique, Université ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [24]. F. Bencherif, Evaluation du risque d'accident vasculaire cérébral à l'aide de la logique floue, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2013-2014

Résumé

Les propriétés mécaniques des composites de polychlorure de vinyle (PVC) extrudés ne peuvent pas être facilement prédites en raison de la nature non linéaire de la relation entre la composition du composite et les propriétés après-production qui en résultent. Dans cette étude, nous avons utilisé une technique de logique floue pour prédire et évaluer les propriétés (résistance à la traction et densité) des composites de PVC ayant différents pourcentages en poids de PVC vierge, CaCO₃, plastifiants et PVC recyclé. Les résultats du modèle floue montrent qu'il existe une bonne concordance avec les résultats expérimentaux, avec une précision de 90,14 % pour calcul la résistance à la traction et de 97,93 % pour calcul la densité du composites.

Mots clés: propriétés mécaniques, composites de polychlorure de vinyle (PVC), logique floue.

Abstract

The mechanical properties of extruded polyvinyl chloride composites cannot be readily predicted due to the non-linear nature of the relationship between the composition of the compound and the resulting post-production properties. In this study, we used a fuzzy logic technique to predict and evaluate the mechanical properties (tensile strength and density) of PVC composites containing different weight ratios of raw PVC, calcium carbonate, plasticizers and recycled plastics. . The results of the fuzzy model showed good agreement with the experimental results, where the precision was 90.14% for the calculation of tensile strength and 97.93% for the calculation of the composite density.

Keywords: mechanical properties, polyvinyl chloride (PVC) composites, fuzzy logic.

ملخص

لا يمكن التنبؤ بسهولة بالخصائص الميكانيكية لمركبات كلوريد البولي فينيل المنبتق بسبب الطبيعة غير الخطية للعلاقة بين تركيبة المركب وخصائص ما بعد الإنتاج الناتجة. في هذه الدراسة ، استخدمنا تقنية المنطق الضبابي للتنبؤ وتقييم خواص (PVC) (قوة الشد والكثافة) التي تحتوي على نسب وزنية مختلفة من (PVC) الخام وكربونات الكالسيوم ، والملدنات ، والبلاستيك المعاد تدويره. أظهرت نتائج النموذج الضبابي وجود توافق جيد مع النتائج التجريبية، حيث بلغت الدقة 90.14% لحساب مقاومة الشد و 97.93% لحساب كثافة المركب

الكلمات المفتاحية: الخواص الميكانيكية ، مركبات البولي فينيل كلوريد (PVC) ، المنطق الضبابي.