

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/2021

المرجع : ...../م/م / 2021

## Mémoire de Master

Présenté au

**Département** : Génie Électrique  
**Domaine** : Sciences et Technologies  
**Filière** : Electrotechnique  
**Spécialité** : Réseaux Electriques

Réalisé par :

**GUENNOUN Souad**

Et

**KACEL Fadhila**

## Thème

**Etude du vieillissement électrique des polymères en  
composite( PVC/PVC dopé)**

Soutenu le: **30/10/2021**

Devant la commission composée de :

Mr :	CHELBI Salim	M.C.B	Univ. Bouira	Président
	BENSAID Samir	Prof.	Univ. Bouira	Examineur
	BERRAG Amine	M.C.B	Univ. Bouira	Rapporteur

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire :*

« الحمد لله الذي هدانا و ما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله »

*Merci Allah de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'à bout du rêve et la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.*

*A Ma très chère mère, Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je te porte, ni la profonde gratitude que je te témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que tu n'as jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.*

*A mon cher père qui m'a toujours soutenue moralement, ma encouragé et ma poussé à poursuivre mes études que Dieu le garde en bonne santé.*

*A mes deux princes frères Aziz et Yazid qui sont toujours là pour moi que Dieu vous garde pour moi.*

*A mes ami(e)s spécialement Célia, Souhila pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A Ma binôme KACEL Fadhila.*

*Souad*

---

## *Remerciements*

*Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.*

*Tout d'abord nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la santé et le courage d'arriver au terme de ce travail.*

*Nous tenons à remercier, en premier lieu, **Dr. BERRAG Amine**, Directeur de ce mémoire d'avoir encadrer notre projet .*

*Nous exprimons nos plus vifs remerciements à Madame **OUDFEL Ghania** et tous les enseignants de l'université de MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou spécialement **Mr. SLIMANI Ferhat**, **Mr. MOUDOUD Mustapha** et **Mr. BELHITÉCHE EL'hadji** pour nous avoir suivi et soutenu durant toute la période de stage .*

*Nous remercions également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail .*

*Enfin, sans oublier, de remercier tous ceux qu'ils nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail.*

---

# Résumé

## Résumé :

Les polymères sont aujourd'hui largement utilisés dans le monde industriel. On les retrouve, quand l'isolation des machines électriques, dans isolation des câbles, etc.

Cependant, quand ils (polymères) sont mis en service, ils sont vulnérables à l'action des paramètres environnementaux (température, humidité...etc.). Dans notre étude nous sommes intéressés à l'influence du vieillissement électrique sur les propriétés du PVC /PVC dopé utilisé dans l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique. La première partie de notre travail est consacré à la recherche bibliographique, nous avons donné quelques généralités sur les polymères, ainsi que les matériaux diélectriques, en suite sur le vieillissement et ces différent types et les mécanismes de claquage. Dans la deuxième partie de notre étude Nous avons montré que l'augmentation de la durée d'application de contrainte électrique influe directement sur les propriétés du PVC par l'augmentation des pertes diélectriques, et le facteur de dissipation. Par une étude comparative l'ajoute des dopants ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) au PVC Vierge dans les mêmes conditions (temps de vieillissement) améliore les propriétés par la diminution des pertes et de facteur de dissipation et augmentation de la permittivité relative et on conclut d'après les résultats obtenues que le  $\text{BaTiO}_3$  est un meilleur dopant par rapport aux autres.

**Mots clés :** Polymères, Paramètres diélectriques, PVC, dopants, vieillissement électrique.

---

# Table des Matières

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Table des Matières .....	III
Liste des Figures.....	IV
Liste des Tableaux.....	V
Listes des Acronymes et Symboles .....	VI

## **Introduction Générale** **1**

### **Chapitre 1 : Généralités sur les polymères**

1. Introduction .....	3
2. définition d'un polymère .....	3
2.1. Monomère.....	4
2.2. Exemples de polymères usuels .....	4
2.3. Composition élémentaires .....	5
3. Polymérisation.....	5
3.1. Polymérisation par étape .....	5
3.2. Polymérisation en chaine .....	6
4. Classification des polymères .....	6
4.1. Selon le mode de synthèse .....	6
4.1.1. Homopolymères .....	6
4.1.2. Copolymères.....	7
4.2. Selon l'origine .....	8
a. Polymères naturels .....	8
b. Polymères artificiels .....	8
c. Polymères synthétiques .....	8
4.3. L'architecture des polymères .....	8
a. Les polymères d'architecture linéaire .....	8
b. Les architectures ramifiées .....	8
c. Les polymères réticulent .....	8
4.4. Selon la géothermie .....	9
a. Polymères amorphes .....	9
b. Polymères cristallins .....	9
c. Polymères semi-cristallins.....	9
4.5. Selon la propriété.....	9
4.5.1. Propriété électriques .....	9

---

4.5.2. Propriété chimique .....	10
4.5.3. Propriété physique .....	10
4.5.4. Propriété thermique .....	10
4.6. Selon l'importance économique .....	10
4.7. Selon l'utilisation .....	11
5. Avantages et inconvénients .....	11
6. Conclusion .....	12

## Chapitre 2 : Matériaux diélectriques et PVC

1. Introduction .....	13
2. Diélectrique .....	13
2.1. Caractéristiques d'un diélectrique .....	13
2.1.1. Permittivité relative .....	13
2.1.2. Rigidité diélectrique .....	14
2.1.3. La conductivité .....	15
2.1.4. Facteur de perte diélectrique .....	15
2.2. Influence de fréquence .....	16
2.3. Circuit équivalent d'un diélectrique .....	16
2.3.1. Circuit parallèle équivalent.....	17
2.3.2. Circuit série équivalent .....	17
3. Polarisation .....	18
3.1. Différents types de polarisation .....	18
a. Polarisation électronique .....	18
b. Polarisation ionique (atomique) .....	18
c. Polarisation d'orientation .....	18
d. Polarisation inter faciale .....	19
4. Phénomène de conduction de charges dans les polymères.....	20
5. la différence entre la polarisation et la conduction.....	20
6. La différence entre les isolants et les diélectriques .....	20
7. Isolant .....	21
7.1. Classification des matériaux isolants .....	21
7.1.1. Isolants liquides .....	21
7.1.2. Isolants gazeux .....	21
7.1.3. Isolants solide .....	22
7.1.4. Isolants mixte.....	22
8. Poly chlorure de vinyle(PVC) .....	22
8.1. Formule.....	22

---

8.2. Fabrication du PVC .....	23
8.3. Synthèse de monomère .....	24
8.4. Formes de PVC.....	24
8.5. Propriétés du PVC .....	24
8.5.1. Propriétés physico-chimiques.....	24
8.5.2. Propriétés électriques.....	25
8.5.3. Propriétés thermiques .....	25
8.6. Recyclage de PVC .....	25
8.7. Usages et applications du PVC.....	26
8.8. Utilisation de PVC pour le transport d'électricité .....	27
9. Effet des dopants sur les propriétés des polymères .....	28
9.1. Dopage chimique .....	28
9.2. Dopage électrochimique .....	28
10. Avantages et les inconvénients de PVC .....	28
11. Conclusion .....	29

### **Chapitre3 : Vieillessement électrique**

1. Introduction .....	30
2. Vieillessement .....	30
2.1. Modes de vieillessement .....	31
2.1.1. Vieillessement physique .....	31
2.1.2. Vieillessement thermique .....	31
2.1.3. Vieillessement électrique .....	31
3. Phénomènes électriques .....	32
3.1. Décharge partielle.....	32
3.1.1. Effet couronne .....	32
3.1.2. Application de la décharge couronne .....	33
3.2. Charge d'espace .....	33
3.2.1. Origines des charges d'espace.....	33
4. Claquage des isolants .....	34
4.1. Dans les isolants solides .....	34
4.2. Dans les isolants liquides et gazeux .....	34
4.3. Caractères généraux du claquage .....	35
4.4. Différents Mécanismes de claquage .....	35
4.5. Types de claquage .....	36
4.5.1. Claquage thermique.....	36
4.5.2. Claquage électromécanique.....	37

---

4.5.3. Claquage électronique .....	37
A. Claquage intrinsèque.....	37
B. Claquage par avalanche .....	37
5. Conclusion .....	38

## Chapitre 4 : Partie expérimentale

1. Introduction .....	39
2. Préparation des échantillons .....	39
2.1. Préparation des films PVC .....	39
2.2. Dopants utilisées .....	41
2.1.1. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	41
2.1.2. TiO <sub>2</sub> .....	41
2.1.3. CaCO <sub>3</sub> .....	42
2.1.4. BaTiO <sub>3</sub> .....	42
3. Vieillissement électrique .....	43
4. Caractérisation des éprouvettes .....	45
4.1. RLC mètre .....	45
5. Etapes de la caractérisation .....	46
6. Calcul des pertes.....	47
7. Calcul de courant diélectrique.....	48
8. Résultats et discussions .....	48
8.1. Permittivité relative .....	48
8.2. Facture de dissipation.....	51
8.3. Pertes diélectriques $\Delta p$ et permittivité relative $\epsilon_r$ et le facteur d dissipation pour 3hr de vieillissement .....	45
9. Conclusion.....	56

<b>Conclusion Générale</b>	<b>58</b>
----------------------------	-----------

<b>Références</b>	<b>59</b>
-------------------	-----------

<b>Annexe</b>	<b>62</b>
---------------	-----------

(Ne pas supprimer ce saut de section)



# Liste des Figures

Fig. 1.1.Exemples des produits a base des polymères .....	3
Fig. 1.2. .Unité monomères .....	4
Fig. 1.3. Polymérisation de nylon.....	6
Fig. 1.4. Polymérisation d'éthylène.....	6
Fig. 1.5. Architecture des macromolécules. ....	9
Fig. 1.6. Structure des polymères. ....	9
Fig. 2.1. Schéma d'un dielectrique .....	13
Fig. 2.2.Un condensateur rempli par air (ou vide). ....	14
Fig. 2.3. Schéma équivalent d'un condensateur. ....	15
Fig. 2.4. Angle de perte .....	16
Fig. 2.5. Circuit RC parallèle.....	17
Fig. 2.6. Circuit RC série.....	17
Fig. 2.7. Un modele dielectrique classique montrant l'interaction du champs electrique avec un atome .....	18
Fig. 2.8. Illustration schématique des différents mécanismes de polarisation. ....	19
Fig. 2.9. Mécanisme de polarisation et évolution de $\epsilon'$ et $\epsilon''$ en fonction de la fréquence.....	19
Fig. 2.10.Formule de PVC. ....	23
Fig. 2.11.Polymérisation de PVC.....	23
Fig. 2.12. Structure type d'un câble unipolaire à isolation PVC.....	27
Fig. 3.1. Effet couronne. ....	33
Fig. 3.2. Différentes types de claquage des isolants solides.....	34
Fig. 3.3. vieillissement, degradation et rupture d'un isolants en fonction de temps et de champs electrique auquel ces mecanismes sont lieu .....	36
Fig. 3.4. Schema descriptif de l'avalanche .....	38
Fig. 4.1. Poudre de PVC .....	39
Fig. 4.2. Mélangeur a 2 cylindres (Rodolfo Comercio) 1977. ....	40
Fig. 4.3. Films de PVC vierge et dopes.....	41
Fig. 4.4. Chambre d'essaies de la haute tension.....	43
Fig. 4.5. Éprouvettes coupés pour l'essai. ....	43
Fig. 4.6. Formes et dimensions de l'électrode.....	44
Fig. 4.7. Support des électrodes.....	44
Fig. 4.8. Plaque verte utilisée. ....	44

---

Fig. 4.9. Pupitre de commande.....	44
Fig. 4.10.Montage expérimental du vieillissement électrique. ....	45
Fig. 4.11.Eprouvettes vieilles de PVC Vierge. ....	45
Fig. 4.12. a) RLC mètre, b) électrodes. ....	45
Fig. 4.13.dispositif expérimental.....	46
Fig. 4.14. Variation de la permittivité relative $\epsilon_R$ du PVC Vierge en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.. ....	49
Fig.4.15.Variation de la permittivité relative $\epsilon_R$ du PVC+10%BaTiO <sub>3</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	49
Fig. 4.16. Variation de la permittivité relative $\epsilon_R$ du PVC+10%TiO <sub>2</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	50
Fig. 4.17.Variation de la permittivité relative $\epsilon_R$ du PVC+10%CaCO <sub>3</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	50
Fig. 4.18. Variation de la permittivité relative $\epsilon_R$ du PVC+10%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	51
Fig. 4.19. Variation du facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ du PVC Vierge en fonction de fréquence et de temps de vieillissement. ....	52
Fig. 4.20. Variation du facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ du PVC+10%BaTiO <sub>3</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	52
Fig. 4.21. Variation du facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ du PVC+10%TiO <sub>2</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	53
Fig. 4.22. Variation du facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ du PVC+10%CaCO <sub>3</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	53
Fig. 4.23. Variation du facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ du PVC+10%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.....	54
Fig. 4.24. Variation des pertes des cinq PVC durant 3 heures de vieillissement en fonction de la fréquence.....	55
Fig. 4.25. Variation du facteur de dissipation $\text{tg}\delta$ des cinq PVC durant 3 heures de vieillissement en fonction de la fréquence.....	55
Fig. 4.26. Variation de la permittivité relative $\epsilon_r$ des cinq PVC durant 3 heures de vieillissement en fonction de la fréquence.....	56

---

## Liste des Tableaux

Tab.1.1.	Exemple des polymères les plus utilisés.....	04
Tab.1.2.	Principaux éléments chimique des polymères. ....	5
Tab.1.3.	Avantages et inconvenants des matériaux polymères.....	11
Tab.2.1.	Comparaison entre un diélectrique et un isolant.....	20
Tab.2.2.	Pourcentage de PVC recycle en 2018.....	26
Tab.2.3.	Avantages et inconvénients de PVC.....	28
Tab.4.1.	Caractéristiques d'Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	41
Tab.4.2.	Caractéristiques de TiO <sub>2</sub> .....	42
Tab.4.3.	Caractéristiques de CaCO <sub>3</sub> . ....	42
Tab.4.4.	Caractéristiques de BaTiO <sub>3</sub> .....	43

---

# Listes des Acronymes et Symboles

## • Acronymes

PVC	Polychlorure de vinyle
VCM	Monomère de chlorure
PP	Polypropylène
PE	Polyéthylène
PET	Polyethylene terephatale
PA	Polyamides
PS	Polystyrene
EP	Epoxydes
UP	Polypteresinsatures
HT	Haute tension
THT	Très haute tension
BT	Basse tension
DP	Décharge partielle
F	Fréquence
CaCO <sub>3</sub>	Le carbonate de calcium
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	L'alumine
TiO <sub>2</sub>	Le dioxyde de titane
BaTiO <sub>3</sub>	Le titanate de baryum

## • Symboles

$\delta$	L'angle de perte diélectrique	rad/s
$\tan \delta$	Facteur de perte diélectrique	
$\sigma$	La conductivité	rad/s
$\omega$	La pulsation	KHz
$\varepsilon''$	Indice de perte	F/m
$\varepsilon$	Permittivité diélectrique	F/m

$\epsilon_r$	Permittivité relative	F/m
$\epsilon_0$	Permittivité du vide	F/m
$C$	Capacité	F
$C_0$	Capacité d'un système d'électrode immergée dans le vide	F
$R_p$	Resistance due aux pertes dans un diélectrique	$\Omega$
$R_s$	Resistance en série due aux connexions des armateurs	$\Omega$
$Z_p$	Impédance équivalent d'un circuit RC	$\Omega$
$L_s$	Inductance série	$\Omega$
S	Surface	mm
$I_f$	Courant de fuit	A

---

## ملخص

تستخدم البوليمرات على نطاق واسع في الصناعة اليوم. توجد عند عزل المحركات ، عزل الكابلات ، إلخ. ومع ذلك ، عندما يتم في بحثنا ، نحن مهتمون بتشغيلها (البوليمرات) ، فإنها تتأثر بسهولة بالمعايير البيئية (درجة الحرارة ، والرطوبة ، وما إلى ذلك) (المخدر) المستخدم في عزل الكابلات لنقل الطاقة الكهربائية. تم تخصيص الجزء PVC/PVC بتأثير التقادم الكهربائي على أداء الأول من عملنا للبحث الببليوغرافي ، حيث قدمنا بعض التعريفات العامة للبوليمرات والمواد العازلة للكهرباء ، ثم قدمنا التقادم وهذه الأنواع المختلفة وآليات الانهيار في الجزء الثاني من بحثنا ، أظهرنا أن هناك زيادة في مدة يؤثر تطبيق الضغوط الكهربائية بشكل عن طريق زيادة فاقد العازل الكهربائي وعامل التبيد. من خلال الدراسات المقارنة ، يمكن أن تؤدي إضافة PVC مباشر على أداء النقي تحت نفس الظروف (وقت التقادم) إلى تحسين الأداء عن PVC إلى  $\text{CaCO}_3$  ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ،  $\text{TiO}_2$  ،  $\text{BaTiO}_3$  المنشطات) هو  $\text{BaTiO}_3$  طريق تقليل عامل الفقد والتبيد وزيادة العزل النسبي الثابت ، ومن النتائج التي تم الحصول عليها. خلص إلى أن أفضل منشط من المنشطات الأخرى.

**الكلمات المفتاحية:** البوليمرات ، العوامل العازلة ، PVC ، منشطات ، شيوخوخة كهربائية.

## Résumé

Les polymères sont largement utilisés dans l'industrie d'aujourd'hui. On les trouve lorsque les moteurs sont isolés, les câbles sont isolés, etc. Cependant, lorsqu'ils (polymères) sont mis en service, ils sont facilement affectés par les paramètres environnementaux (température, humidité, etc.). Dans nos recherches, nous nous intéressons à l'effet du vieillissement électrique sur les performances du PVC/PVC dopé utilisé dans l'isolation des câbles pour la transmission de l'énergie électrique. La première partie de notre travail a été consacrée à la recherche bibliographique. Nous avons donné quelques introductions générales aux polymères et matériaux diélectriques, puis introduit le vieillissement et ces différents types et mécanismes de claquage. Dans la deuxième partie de notre recherche, nous avons montré qu'une augmentation de la durée d'application des contraintes électriques affecte directement les performances du PVC en augmentant les pertes diélectriques et le facteur de dissipation. Grâce à des études comparatives, l'ajout de dopants ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) au PVC pur dans les mêmes conditions (temps de vieillissement) peut améliorer les performances en réduisant le facteur de perte et de dissipation et en augmentant la constante diélectrique relative, et à partir des résultats obtenus Il est conclu que  $\text{BaTiO}_3$  est un meilleur dopant que les autres dopants.

**Mots clés :** Polymères, Paramètres diélectriques, PVC, dopants, vieillissement électrique.

## Abstract

Polymers are widely used in industry today. They are found when motors are insulated, cables are insulated, etc. However, when they (polymers) are put into service, they are easily affected by environmental parameters (temperature, humidity, etc.). In our research, we are interested in the effect of electrical aging on the performance of doped PVC / PVC used in the insulation of cables for the transmission of electrical energy. The first part of our work was devoted to bibliographic research. We gave some general introductions to polymers and dielectric materials, then introduced aging and these different types and breakdown mechanisms. In the second part of our research, we showed that An increase in the duration of application of the electrical stresses directly affects the performance of PVC

---

by increasing the dielectric losses and the dissipation factor. Through comparative studies, adding dopants (BaTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>) to pure PVC under the same conditions (aging time) can improve performance by reducing the loss and dissipation factor and increasing the constant relative dielectric, and from the results obtained It is concluded that BaTiO<sub>3</sub> is a better dopant than the other dopants.

**Keywords:** Polymers, Dielectric parameters, PVC, dopants, electrical aging.

---

# Dédicaces

En témoignage de ma profonde affection et de ma reconnaissance, je dédie ce Modeste travail :

A mon chère père qui m'a tout donné, de son amour, ses sacrifices pour que je puisse avoir une vie dans les meilleures conditions et qui ne cesse de m'encourager et de vieillir pour mon bien, sans son soutien ce travail n'aurait jamais vu ce jour.

A ma très chère mère qui m'a toujours soutenu moralement, m'encouragé et ma poussée à poursuivre mes études que dieu la garde en bonne santé

A mes frères Mourad, Rachid, Rayen et petite sœur yousra qui sont tenus debout avec moi et m'encouragé à avance avec succès dans ma vie.

A tout ma famille et mes amis (Fatima, souhila, Lyliya, amira, Katia, Louiza, vaww, soumia) merci pour vos conseil et vos soutiens.

A ma collègue, qui m'a toujours poussée et encouragée au cours de la réalisation ce mémoire

A tous ceux qui me connaissent et qui m'ont encouragé de près ou de loin.

Fadhila



## Résumé

Les polymères sont aujourd'hui largement utilisés dans le monde industriel. On les retrouve, quand l'isolation des machines électriques, dans isolation des câbles, etc.

Cependant, quand ils (polymères) sont mis en service, ils sont vulnérables à l'action des paramètres environnementaux (température, humidité...etc.). Dans notre étude nous sommes intéressés à l'influence du vieillissement électrique sur les propriétés du PVC /PVC dopé utilisé dans l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique. La première partie de notre travail est consacré à la recherche bibliographie, nous avons donné quelques généralités sur les polymères, ainsi que les matériaux diélectriques, en suite sur le vieillissement et ces différent types et les mécanismes de claquage. Dans la deuxième partie de notre étude Nous avons montré que l'augmentation de la durée d'application de contrainte électrique influe directement sur les propriétés du PVC par l'augmentation des pertes diélectriques, et le facteur de dissipation. Par une étude comparative l'ajoute des dopants ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) au PVC Vierge dans les mêmes conditions (temps de vieillissement) améliore les propriétés par la diminution des pertes et de facteur de dissipation et augmentation de la permittivité relative et on conclut d'après les résultats obtenus que le  $\text{BaTiO}_3$  est un meilleur dopants par rapport aux autres.

**Mots clés :** Polymères, Paramètres diélectriques, PVC, dopants, vieillissement électrique.

# Introduction générale

Le domaine de génie électrique reste l'un des principaux secteurs scientifiques qui sollicite actuellement de plus en plus d'investigation. En effet la majorité des technologies, actuelles et futures, utilisées dans nos sociétés est dépendante de l'énergie électrique. On conçoit alors que la fiabilité des systèmes électriques, quelles que soient les difficultés auxquelles ils sont soumis, fasse l'objet de nombreux travaux de recherche.

Les matériaux ont joué un rôle dominant dans les changements faits par les matériels électriques et les matériaux isolants sont parmi ceux dont le choix et l'emploi posent les problèmes les plus sensibles à résoudre dans la génération, la réalisation et l'exploitation des systèmes électriques. Si on applique une tension différente sur le matériel électrique industriel, différentes contraintes qui se traduisent par un vieillissement en fonction du temps d'utilisation [1].

Les matériaux utilisés aujourd'hui sont extrêmement nombreux et variés. Ils sont parmi ceux dont le choix et l'emploi posent les problèmes les plus délicats à résoudre dans leur conception, leur réalisation et leur exploitation. La pérennité de leur fonction est extrêmement importante puisqu'elle conditionne la fiabilité des dispositifs et des systèmes dans lesquels ils sont intégrés. Ils peuvent être obtenus à partir du règne végétal (bois, coton, etc....) ou du règne minéral (pétrole : quasi totalité des matières plastiques)

Le polychlorure de vinyle (PVC), qui fera l'objet de cette étude, joue un rôle prépondérant dans l'industrie des matières plastiques. En 2000, la production mondiale de ce polymère représentait plus de 20 millions de tonnes par an, alors qu'elle n'était que de trois millions de tonnes en 1965, ce qui correspond à environ un cinquième de la production totale de matières plastiques [2]

Toutefois bien que des câbles électriques en PVC présentent des avantages sérieux, il n'en demeure pas moins que ce matériau présente certains inconvénients parmi lesquels nous pouvons citer les pertes de ses caractéristiques physiques et mécaniques. La chaleur, les champs électriques, les produits chimiques ainsi que les radiations peuvent avoir, à long terme, un effet néfaste sur les polymères. Ainsi au cours de leur utilisation, ces gaines peuvent être amenées à perdre leurs qualités. Ce phénomène est connu sous le nom du vieillissement du matériau [3].

Notre étude est consacrée à l'influence des dopants sur les différents paramètres diélectriques du PVC avant et après un vieillissement électrique pendant des durées précises. Ce travail est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé à une étude bibliographique sur les polymères, leur classification est réalisée selon plusieurs critères (le mode de synthèse, l'architecture, la géothermie ainsi que leurs propriétés) et en terminera par quelques avantages et inconvénients

Le deuxième chapitre est réservé à définir les matériaux diélectriques et ces caractéristiques dans sa première partie, et dans la deuxième, on étudie le PVC qui est parmi les matériaux les plus utilisés dans le domaine d'isolation, sa définition, sa formule et sa fabrication.

La première partie du troisième chapitre est consacrée à une étude des différents types de vieillissement des polymères à savoir le vieillissement thermique, électrique ..., la deuxième partie consiste à présenter les différents types de claquages électriques.

Le quatrième chapitre est la partie expérimentale de notre travail qui a été réalisé au niveau de laboratoire de la Haute Tension Université de Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou et couvre la discussion et les interprétations des résultats obtenue.

Enfin, nous achèverons ce mémoire par une conclusion générale qui englobe les résultats obtenus.

# Chapitre 1: Généralités sur les polymères

## 1. Introduction :

Le concept de polymère a été développé par le chimiste allemand Harman Staudinger en 1920, qui a travaillé en solitaire dans le domaine du caoutchouc et des substances apparentées.

Au cours des dernières décennies, les matériaux composites polymères ont suscité un grand intérêt en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, thermiques, électriques et lumineuses et de nombreuses autres propriétés améliorées, et ils sont particulièrement adaptés à une variété d'applications électriques, par exemple, ces matériaux composites sont couramment utilisés comme matériaux semi-conducteurs pour les câbles haute tension. Par rapport aux papiers imprégnés, ils sont moins polluants et plus économiques, et surtout, leur principal avantage est qu'ils sont faciles à produire. Dans ce chapitre, nous allons traiter les matériaux polymères et leurs classifications ainsi que quelques avantages et inconvénients.

## 2. Définition des polymères :

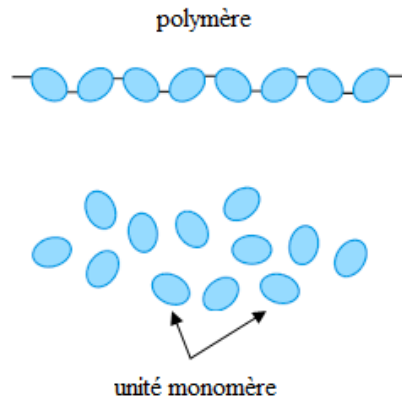
Un polymère vient de grec polus (plusieurs) et meros (parties) ce qui signifie plusieurs parties, on appelle les polymères ou macromolécules une grande molécule de masse molaire élevée, constituée d'une multitude d'unités qui se répète appelées monomères (motifs monomères), sont toutes les mêmes (homopolymère) ou de différente nature (copolymère) reliée par des liaisons covalentes [4].



**Figure 1.1 :** Exemples des produits à base des polymères.

### 2.1. Un monomère :

Est un composé constitué de molécules simple pouvant réagir avec d'autres monomères par la polymérisation pour donner un polymère [5].



**Figure 1.2 :** Unité monomères

### 2.2. Exemple de polymères usuels :

Le tableau 1.1 représente des exemples de polymères et leurs domaines d'utilisation :

Monomère	Polymère	L'utilisation
éthylène $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	polyéthylène (PE) $-(\text{CH}_2 - \text{CH}_2)_n$	Matériau d'emballage par excellence.
propylène $\text{CH}_2 = \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH} \end{array}$	polypropylène (PP) $-(\text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH} \end{array})_n$	C'est un plastique dur, On le retrouve dans tous les matériaux de plomberie.
chlorure de vinyle $\text{CH}_2 = \begin{array}{c} \text{Cl} \\   \\ \text{CH} \end{array}$	polychlorure de vinyle (PVC) $-(\text{CH}_2 - \begin{array}{c} \text{Cl} \\   \\ \text{CH} \end{array})_n$	On l'utilise pour la fabrication des chaussures synthétiques et des disques tel que les câbles de transport d'énergie électrique

**Tableau 1.1.** Exemples des polymères les plus utilisés [6]

### 2.3. Composition élémentaire :

La majorité des matériaux polymères formée de 9 éléments chimique tel que :

Elément	Masse atomique	Symbole	Valence	Rayon de van der Waals [Å]
Hydrogène	1	H	1	1,2
Carbone	12	C	2,3 ou 4	1,7
Azote	14	N	3 ou 5	1,55
Oxygène	16	O	2	1,5
Fluor	19	F	1	1,47
Silicium	28	Si	4	2,1
Phosphore	31	P	3 ou 5	1,8
Soufre	32	S	2, 4 ou 6	1,8
Chlore	35,5	Cl	1,3,5 ou 7	1,75

**Tableau 1.2 :** Principaux éléments chimique des polymères [7]

### 3. Polymérisation :

La polymérisation est une transformation chimique, permettant la synthèse de polymères à partir de molécule réactives, il se forme un enchainement de ou des motifs de répétition par liaison entres atomes, et on obtient en finale des macromolécules de masse molaire élevée, il existe deux types de polymérisation par addition et par condensation [8]

#### 3.1. La polymérisation par étapes (polycondensation) :

Les macromolécules formées par réactions par étape, entre les fonctions chimiques réactives portées par les molécules monomères ou polymères. Chaque molécule peut croître par réaction avec n'importe quelle autre molécule (mono, di, tri, tétra, etc. -mère), en cite Polyesters, PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamides), Polyuréthanes.

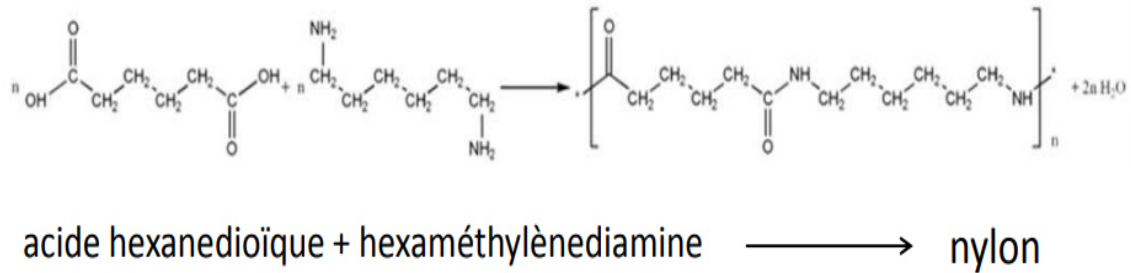


Figure 1.3 : Polymérisation de nylon

### 3.2. La polymérisation en chaîne (polyaddition) :

Un centre actif initial unique (ion, radical ou complexe organométallique) provenant d'un initiateur permet la formation d'une chaîne de polymère. La chaîne ne peut croître que par réaction d'un monomère avec la fonction chimique réactive située à l'extrémité de la chaîne en croissance comme le PVC et l'éthylène [8].

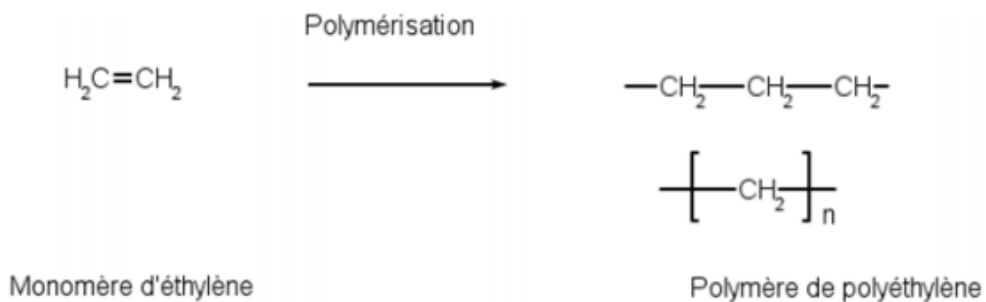


Figure 1.4 : Polymérisation d'éthylène

## 4. Classification des polymères:

Les polymères sont classés selon des différents critères ; selon le mode de synthèse, l'origine, l'architecture, la géométrie, les propriétés, l'importance économique et selon l'utilisation.

### 4.1. Selon le mode de synthèse (les nombres de motifs) :

On trouve deux types de polymères : les homopolymères et les copolymères

#### 4.1.1. Homopolymère :

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité qui se répète (une longue chaîne de même monomère répété). Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles en site les homopolymères linéaire, branchés et étoile.

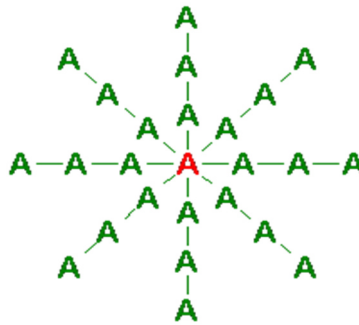
- Les homopolymères linéaires :



- Les homopolymères branchés :



- Les homopolymères étoilés :

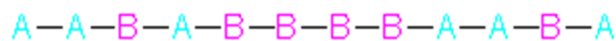


## 4.1.2. Copolymères :

Copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités en trouvent plusieurs modes, le mode statique, alterné, séquentiel et greffé [9].

A et B sont des unités monomères.

- Le mode statique :



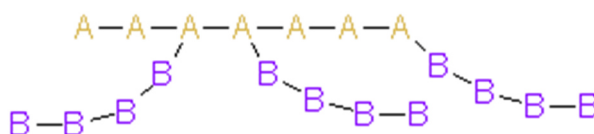
- Le mode alterné :



- Le mode séquentiel :



- Le mode greffé :





### 4.2. Selon l'origine :

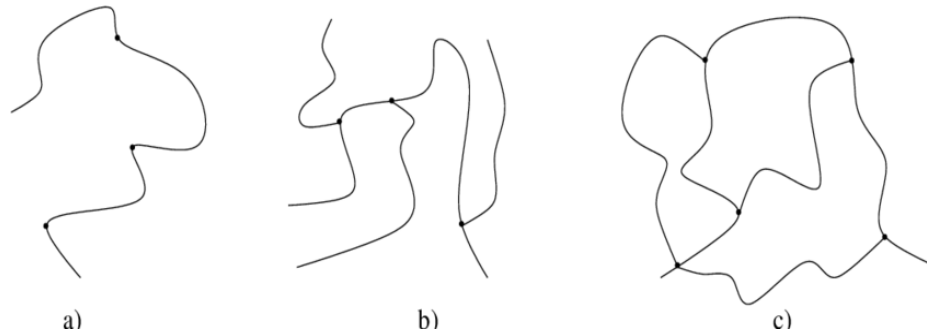
Il existe 3 origines des polymères, naturels, artificiels et synthétique.

- a) **Polymères naturels** : existent dans la nature (végétales ou animales) comme ils sont très nombreux tels : Les polysaccharides (cellulose, amidon...), les protéines (la laine, la soie...) et le caoutchouc naturel ...
- b) **Polymères artificiels** : sont obtenus par la modification chimique de polymères naturels afin de transformer certaines de leurs propriétés, et certains d'entre eux, comme esters de cellulose (nitrocellulose, l'acétate de cellulose, etc.), ont été économiquement important pour une longue période
- c) **Polymères synthétiques** : les molécules de monomère à partir desquelles elles sont obtenues n'existent pas dans la nature, mais sont produites par l'être humaine par des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation comme polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle(PVC) et le polystyrène (PS) [10].

### 4.3. L'architecture des polymères :

L'architecture des polymères peuvent être divisée en plusieurs familles : polymères linéaires, ramifiés et réticules.

- a. **Les polymères d'architecture linéaire** : sont essentiellement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne ou par étapes
- b. **Les architectures ramifiées** : 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.
- c. **Les polymères réticules** : la réticulation correspond à la formation de différentes liaisons chimiques (polymérisation par condensation ou addition), et conduit à la formation d'un réseau [5].



**Figure 1.5 :** Architecture des macromolécules, a) polymère linéaire, b) polymère ramifié, c) polymère réticulé

### 4.4. Selon la géothermie :

La géothermie des macromolécules caractérise par l'ordre atomique et la distribution des liaisons, on distingue selon cette caractérisation plusieurs types :

- a) **Polymères amorphes** : les atomes sont désordonnés le long de la chaîne du polymère.
- b) **Polymères cristallins** : sont des polymères qui peuvent posséder une structure semi ordonnée suite à certaines conditions de refroidissement lentes après fusion
- c) **Polymères semi-cristallins** : ils comportent des zones cristallines donc organisées et des zones amorphes désordonnées. Les polymères orientés ou fibre font partie de cette famille cristalline [11].



Figure 1. 6 : Structure des polymères

### 4.5. Selon la propriété :

#### 4.5.1. Propriétés électriques :

- a. **Résistivité superficielle** : la résistance à la décharge électrique superficielle est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le

matériau, et en le carbonisant, le rendre conducteur. La résistance superficielle est fortement influencée par l'humidité.

- b. **Résistivité transversale :** elle caractérise le pouvoir isolant du matériau. Pour la majorité des polymères la valeur de la résistivité transversale est supérieure à  $10^{12}$  Q.cm à la température ambiante [12].

**4.5.2. Propriétés chimiques :** ces propriétés désignent plusieurs caractéristiques : imperméabilité aux liquides et aux gaz, résistance chimique aux solvants et résistance aux rayons ultraviolets.

**4.5.3. Propriétés physiques :** les caractéristiques d'un polymère dépendent de la masse volumique des matières plastique. La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique et leur enchainement.[13]

**4.5.4. Propriétés thermiques :** les polymères peuvent se regrouper en trois tel que les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

- a) **Les thermoplastiques :** Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaire liée par des liaisons covalentes faible qui permet de ramollisse à la chaleur jusqu'à l'état plastique, c'est à dire les thermoplastiques récupère son état partiellement cristalline ou, donc il est recyclable en site quelques exemples : polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS).

**b) Les thermodurcissables :**

Sont des polymères qui constituée des chaines linéaire réticule entre eux avec des liaisons covalentes forte et ce sont rigide et plus durs que les polymères thermoplastiques Les thermodurcissables sont stables même à la température élevée il ne peut jamais revenir à l'état initiale (non recyclable) comme les polyptères insaturés (UP) et les époxydes (EP)

**c) Les élastomères :**

Élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques » réversibles obtenues après réticulation, comme le caoutchouc naturel, polybutadiène et poly isoprène [14].

### **4.6. Selon l'importance économique :**

Les matériaux polymères ont suscité un grand intérêt en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, thermiques, électriques et lumineuses, et de nombreuses autres propriétés améliorées. Ces propriétés sont particulièrement adaptées à une variété d'applications électriques. Il existe 3 types de polymères commerciaux :

## Chapitre 1 : Généralités sur les polymères

- **Les polymères de grande diffusion** : dont le volume des ventes et de productions est élevé et dont le prix est faible tel que 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 comme le polyamide [15].

### 4.7. Selon l'utilisation :

S'il est un domaine où les polymères sont le plus couramment utilisés, c'est celui du conditionnement. Autant les matériaux polymères sont utilisés :

1. Dans l'industrie électrique et électronique : les écrans plats, les fibres optiques dans les systèmes d'imagerie infrarouge, boîtiers et gainage de câbles
2. Dans le secteur de l'emballage et du conditionnement utilisé dans :
  - L'emballage alimentaire (bouteilles, boîtes à œufs),
  - L'emballage des produits pétrolier
  - Produits pharmaceutiques
  - Produits pour le revêtement.
3. Dans le secteur mécanique : des pièces thermo formables pour carrosseries, des pare-chocs les carrosseries d'automobile
4. Dans le bâtiment et l'équipement : des plaques isolantes du froid et du chaud, peintures, isolation, tuyauterie.
5. Dans l'industrie alimentaire et le textile : fibres textiles naturelles et synthétiques, ski
6. Dans le secteur médical : seringues, poches, tubes pour transfusion [16].

### 5. Avantages et inconvénients :

Avantages	Inconvénients
Bon isolant thermique	Matière première limitée
En faisant varier les liaisons des atomes carbonés, on peut une variété infinie de matières plastique	Sensible à la température

## Chapitre 1 : Généralités sur les polymères

---

Généralement inertes	Mou (bas module d'élasticité)
Facilite de mise en forme de moulage	Susceptible au feu

**Tableau 1.3 :** Avantages et inconvénients des matériaux polymères [9]

### 6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les polymères telle que leur classification selon (l'origine, l'architecture, la géométrie, les propriétés, selon l'importance économique et l'utilisation dans l'industrie) et nous terminons par quelque avantages et inconvénients des matériaux polymères. Dans le prochaine chapitre nous allons traite les matériaux diélectriques et l'un des matériaux le plus important et le plus utilisé dans l'isolation des câbles électriques qui est le PVC.

# Chapitre 2: Matériaux diélectriques et PVC

## 1. Introduction :

Les matériaux diélectriques à base de polymères sont de plus en plus utilisés dans l'industrie, notamment dans le domaine de l'électrotechnique : transformateurs, câbles de transmission, condensateurs, etc., grâce à leurs propriétés physiques. En raison de leur légèreté, de leur facilité de manipulation, de leurs bonnes performances par temps pollué, de leur réduction des coûts et de leur résistance aux diverses pressions, ils ont toujours fait l'objet de sélection de matériaux dans l'industrie électrique. Aujourd'hui, les chercheurs et scientifiques du monde entier cherchent à mettre sur le marché de nouveaux matériaux qui montrent la relation solide/liquide et solide/gaz, ce qui ouvre de nouvelles voies pour leur utilisation.

## 2. Un diélectrique :

C'est un ensemble d'atomes ou de molécules composé d'une électrode négative et d'un noyau atomique positif. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. On compte parmi ces milieux le verre et de nombreux plastiques. Mais les charges associées peuvent se déplacer localement et introduire des courants de polarisation. Par exemple, les câbles électriques sont souvent protégés d'un revêtement en plastique pour éviter que le courant électrique ne puisse en sortir [17].

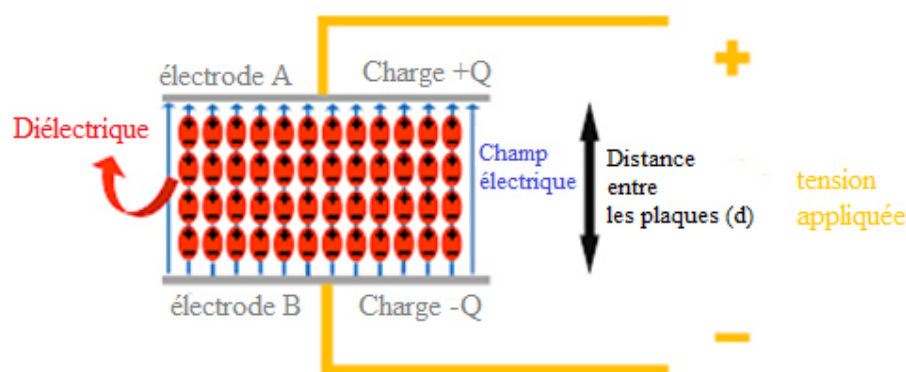


Figure 2.1: Schéma d'un diélectrique

## 2.1. Caractéristiques d'un diélectrique :

### 2.1.1. Permittivité relative :

La permittivité relative  $\epsilon_r$  est définie comme suite :  $\epsilon_r = \frac{c}{c_0}$  (2.1)

$c$  : C'est la capacité d'un système d'électrodes immergées dans le diélectrique.

$c_0$  : C'est la capacité d'un système d'électrodes immergées dans le vide.

Exemple : soit un conducteur plan à vide (ou à air)

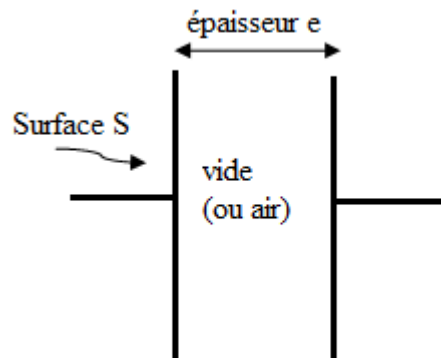


Figure 2.2: Un condensateur rempli par aire (ou vide)

Sa capacité est :  $c_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e}$  (2.2)

Où  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} F/m$  est la permittivité absolue du vide (ou de l'aire)

Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$c_0 = \epsilon_0 c = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e} \tag{2.3}$$

La permittivité relative est définie par le rapport  $\epsilon_r = \frac{c}{c_0}$  (2.4)

La permittivité absolue est :  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  (2.5)

Pour l'air, le gaz et le vide  $\epsilon_r = 1$  donc,  $\epsilon = \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} F/m$

Pour tous les autres isolants  $\epsilon_r > 1$

**2.1.2. Rigidité diélectrique :**

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au-delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparait un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolants en suivant un chemin formé par l'arc lui-même.

Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrodes) [18].

### 2.1.3. La conductivité :

La conductivité électrique  $\sigma$  est un paramètre important pour toutes les applications électriques surtout sous tension continue. A partir des mesures de constante diélectrique et de l'angle de perte diélectrique, d'autres paramètres électriques peuvent être obtenus. Concernant les polymères, la conductivité  $\sigma$  peut s'exprimer sous la forme [15]:

$$\sigma = \omega \tan \delta \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.6)$$

Avec :

$\sigma$  : est la conductivité électrique

$\omega$  : est la pulsation.

$\delta$ : est l'angle de perte diélectrique.

$\epsilon$  : est la permittivité diélectrique.

$\epsilon_0$  : est la permittivité du vide.

### 2.1.4. Facteur de perte diélectrique :

Ce facteur nous permet de connaître la puissance dissipée dans le matériau lorsqu'un champ électrique variable lui est appliqué. Il est exprimé par la tangente de l'angle  $\delta$  qui représente l'écart à la quadrature entre le courant et la tension d'un condensateur ayant le matériau considéré comme diélectrique.

Supposant un dispositif constituant un condensateur réel (avec pertes) est représenté par le schéma équivalent parallèle tel que représenté sur la figure 2.3

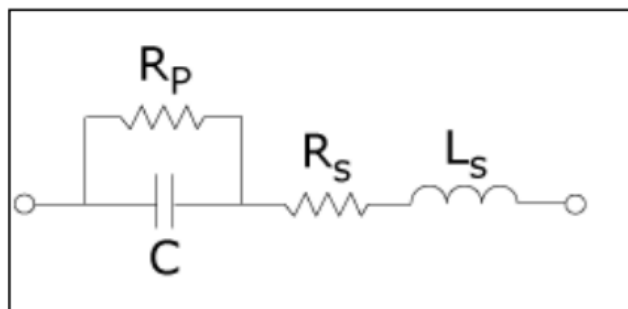


Figure 2.3 : Schéma équivalent d'un condensateur

$R_p$  : Résistance due aux pertes dans le diélectrique. Elle dépend de la résistance de l'isolement.

$R_s$  : Résistance en série due aux connexions des armatures.



$L_s$  : Inductance en série.

Autrement dit l'angle de pertes  $\delta$  est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension  $U$  entre les conducteurs et le courant de fuite  $I$  traversant l'isolant figure 2.4

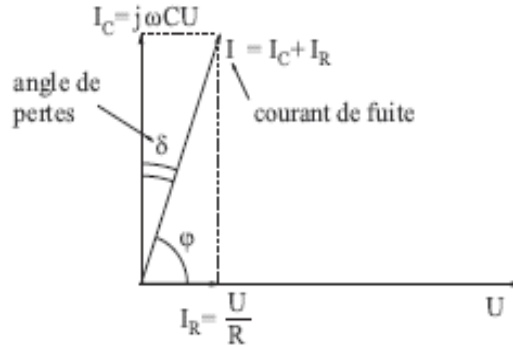


Figure 2.4 : Angle de perte

Le facteur des pertes est donné par :

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega CR} \quad (2.7)$$

$\delta$  : Vitesse angulaire du circuit oscillant (angle parcouru par unité de temps rd/s)

$C$  : Capacité entre les deux conducteurs

$R$  : Résistance d'isolement de l'isolant

En conclusion la valeur  $\tan\delta$  est appelée facteur de dissipation diélectrique. Il caractérise la qualité d'un isolant, en pratique il varie entre  $10^{-2}$  et  $10^{-4}$

**2.2. Influence de la fréquence :**

L'influence de la fréquence de la tension de fonctionnement d'un système électrique, sur le vieillissement des isolants a été mise en évidence sur plusieurs polymères commerciaux sur des matériaux secs, une chute de la rigidité diélectrique a été observée ainsi que la diminution de la durée de vie, en faisant varier la fréquence entre 60 Hz et 1 kHz [19]

**2.3. Circuit équivalent d'un diélectrique :**

Un matériau isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée comme une connexion parallèle / série d'un condensateur et une résistance.

$C$  représente la capacité entre les deux conducteurs et  $R$  est la résistance d'isolement de l'isolant ; elle est toujours  $\geq 10^{12}$

2.3.1. Circuit parallèle équivalent :

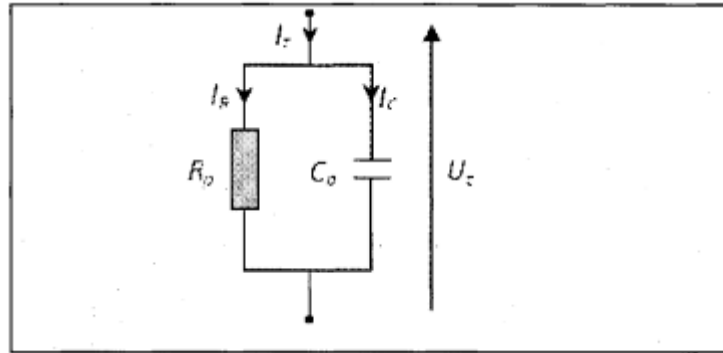


Figure 2.5 : Circuit RC parallèle

L'impédance  $Z_p$  équivalente du circuit RC parallèle (Figure) est :

$$Z_P = \frac{R_p}{1+jR_p C_p \omega} = \frac{R_p}{1+JR_p^2 C_p^2 \omega^2} (1 - JR_p C_p \omega) \quad (2.8)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{R_p C_p \omega}; \epsilon_r = \frac{C_p}{C_0} \epsilon_r = \frac{1}{C_0 R_p \omega} \text{ et } = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (2.9)$$

Cette configuration explique le fait qu'en appliquant une tension alternative à un isolant, il y a une circulation d'un courant de fuite du aux composantes réactive et capacitive. Ce courant de fuite qui est négligeable pour un isolant de bonne qualité, peut pour une dégradation de la qualité de l'isolant devenir important et présenter un danger pour les personnes et les équipements. On note que pour un bon isolant, le courant l'est 100 fois plus grand que  $I_R$ , et faisant un angle d'environ  $90^\circ$  avec la tension appliquée [20].

2.3.1. Circuit série équivalent :

L'impédance équivalente au modèle RC série (figure 2.6) d'un diélectrique est

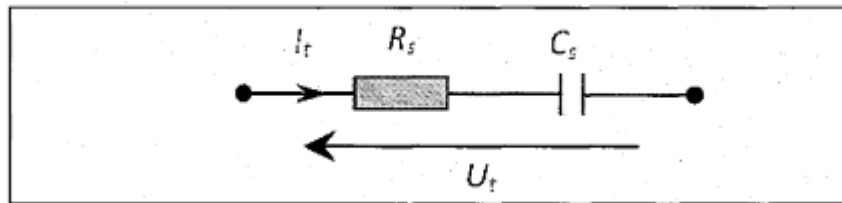


Figure 2.6 : Circuit RC série

$$Z_S = R_S - J \frac{1}{C_S \omega} \quad (2.10)$$

$$\tan \delta = R_S C_S \omega \quad (2.11)$$

$$\epsilon_r' = \frac{C_p}{C_0} \frac{1}{1+(R_S C_S \omega)^2} \quad (2.12)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{C_S}{C_0} \frac{1}{1+(R_S C_S \omega)^2} \quad (2.13)$$

Avec

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (2.14)$$

### 3. Polarisation :

Le phénomène de polarisation provient en général de l'orientation d'un dipôle électrique, induit ou permanent. En absence de champ électrique les charges sont généralement orientées de façon aléatoire et ne peut pas être considérés comme étant dipôles permanents. Mais sous l'action d'un champ électrique externe le matériau réagit et crée un champ interne qui s'oppose au champ électrique : c'est la polarisation. Elle contribue en effet à la valeur de la permittivité relative  $\epsilon_r$  et influence sa variation avec la fréquence ou la température. Elle influe également sur le facteur de perte diélectrique ( $\tan \delta$ ) [18].

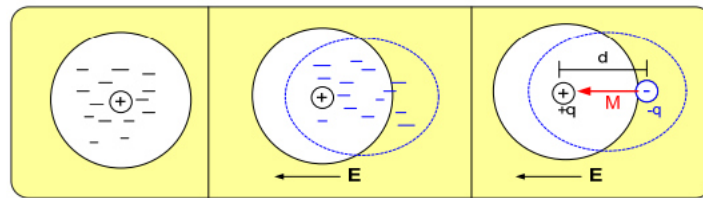


Figure 2.7 : Un modèle diélectrique classique montrant l'interaction du champ électrique avec un atome

#### 3.1. Différents types de polarisation :

La polarisation des matériaux due à plusieurs mécanismes connus sous le nom : électronique, ionique, orientation ainsi polarisation inter faciale [20] [21].

- a. Polarisation électronique :** la polarisation électronique due à un déplacement relatif de noyau de l'atome par rapport à l'ensemble des électrons qui l'entourent, dans ce type la polarisation ce produit rapidement durent un bref moment à l'ordre de  $10^{-15}$  et dans un domaine de fréquence inférieure à  $10^{15}$  Hz
- b. Polarisation ionique (atomique) :** du au déplacement en sens contraire des ions de signe oppose à l'intérieur de la molécule, elle s'établit plus lentement que la précédente pendant une durée de  $10^{-13}$  à  $10^{-12}$  s dans un domaine de fréquence de  $10^{15}$  Hz
- c. Polarisation d'orientation :** la polarisation d'orientation est observée lorsque les molécules possèdent un moment dipolaire permanent, sous l'effet d'un champ les molécules vont s'orienter dans le sens du champ électrique appliqué, elle peut exister seulement dans les gaz et les liquides ainsi dans les matières amorphes car dans les matières solides les dipôles sont figés ne peuvent être orientés, elle s'obtient dans une durée de  $10^{-10}$  à  $10^{-7}$  dans un domaine de fréquence de  $10^8$  Hz

d. **Polarisation inter faciale** : elle est observée aux base fréquence de  $10^{-3}$  à  $10^3$  Hz résulte d'une accumulation locale des charges mobile à la surface du matériau, car le mouvement de ce dernier est arrêté par des barrières physique telles que l'interface et les joints de grains.

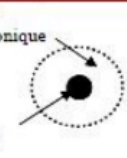
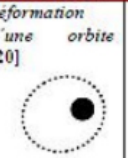
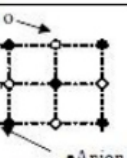
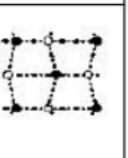
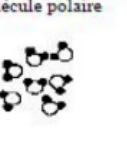
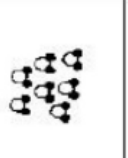


Durée d'établissement	Type de Polarisation	En absence de champ $E=0$	Sous champ électrique $E \rightarrow$	Fréquences
$10^{-14}$ à $10^{-16}$ s	Electronique	Nuage Electronique Noyau 	déformation d'une orbite [20] 	- Domaine de l'UV $10^{12}$ Hz
$10^{-10}$ à $10^{-13}$ s	Ionique ou Atomique	Cation o Anion 		- Domaine de l'IR $10^{12}$ à $10^{22}$ Hz
$10^{-9}$ à $10^{-3}$ s	Dipolaire	Molécule polaire 		- Domaine de l'M.W. $10^8$ Hz (microonde)
$10^{-5}$ à $10^{-3}$ s	Charge d'espace ou Interfaciale	Grain 		- Domaine de l'RH 1 Hz à $10^7$ Hz (Ondes radio)

Figure 2.8 : Illustration schématique des différents mécanismes de polarisation [22]

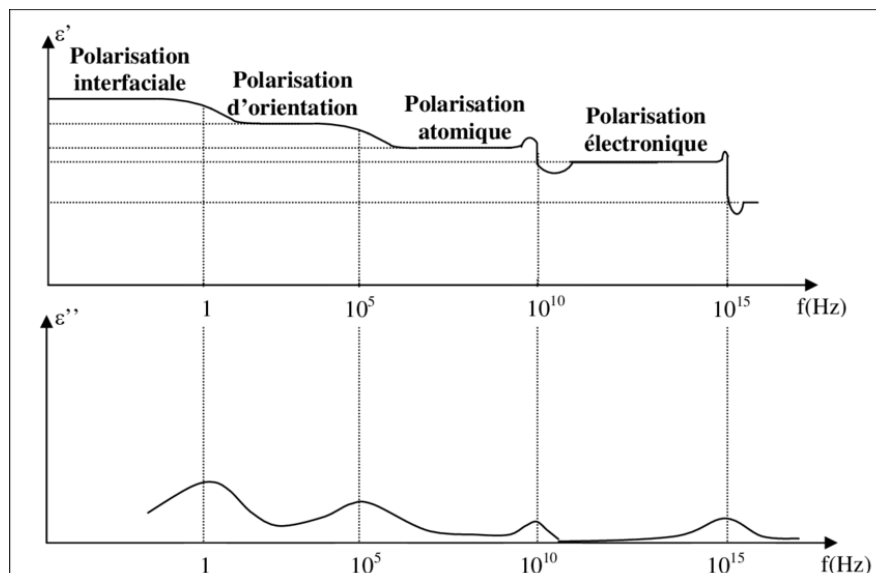


Figure 2.9 : Mécanisme de polarisation et évolution de  $\epsilon'$  et  $\epsilon''$  en fonction de la fréquence.

#### 4. Phénomène de conduction de charges dans les polymères :

Toute charge électrique entraînée dans un mouvement ordonné par un champ électrique constitue la conduction électrique. Les charges électriques susceptibles de donner ainsi naissance à un courant électrique sont des ions ou des électrons.

### 5. la différence entre la polarisation et la conduction :

- Durant la polarisation, les charges sont mises en mouvement mais ne peuvent jamais quitter la molécule. En revanche, la conduction est le déplacement des charges sur de grandes distances qui se libèrent et quittent les particules.
- La conduction dans les diélectriques est pratiquement assurée par les impuretés se trouvant dans l'isolant et non pas due à sa structure de base. La polarisation peut donc être représentée comme un grand nombre de charges se déplaçant sur de très petites distances, sans jamais quitter les molécules. Tandis que la conduction dans les diélectriques comme le déplacement d'une petite quantité de charges mais sur de larges distances.
- La polarisation peut être considérée comme un mouvement élastique. Quand l'effet du champ électrique externe disparaît, les charges reviennent à leur position initiale, ce qui ne se passe jamais pour la conduction.
- Tandis que la conduction se produit tant que la tension continue est appliquée, la polarisation ne se produit que lors de l'application ou de la suppression de la tension. La polarisation, et donc le courant capacitif, ne subsistent que lorsqu'il s'agit d'une tension alternative [20].

### 6. La différence entre les isolants et les diélectriques :

L'une des principales différences entre le diélectrique et l'isolant est que le diélectrique stocke les charges électriques tandis que l'isolant s'oppose au flux d'électrons. Quelques autres différences entre elles sont expliquées dans le tableau ci-dessous [23]

Base de comparaison	Diélectrique	Isolant
Définition	Le matériau dans lequel un champ électrique peut se développer avec le minimum de perte d'énergie est appelé diélectrique.	La substance qui a une faible conductivité et qui crée une obstruction dans le flux de courant est appelée isolant.

<b>Polarisation</b>	Polariser dans un champ électrique.	Ne peut pas polariser
<b>Liaison</b>	Faiblement collé par rapport à l'isolant.	Une liaison covalente
<b>Constante diélectrique</b>	Haute	Faible
<b>Des charges</b>	Stocker les charges	Entrave aux charges.
<b>Exemple</b>	Air sec, aspirateur, eau distillée, etc.	Coton, plastique, mica, etc.
<b>Application</b>	Condensateur, câble d'alimentation, etc.	Fils conducteurs, dans un système haut tension, etc.

Tableau 2.1 : Comparaison entre un diélectrique et un isolant

## 7. Un isolant :

Substance qui a une conductivité électrique suffisamment faible pour être utilisée afin de séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents ; ainsi se comportent l'ambre, le verre, le soufre, etc.

### 7.1. Classification des matériaux isolants :

On peut classer les matériaux isolants en 4 groupes liquide, gazeux, solide et mixte.

#### 7.1.1. Isolants liquides :

Les huiles isolantes représentent l'avantage d'avoir une rigidité diélectrique élevée par rapport aux gaz et d'améliorer les propriétés diélectriques. En électrotechnique, elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Son rôle est d'éliminer l'air et les autres gaz ; ils peuvent être obtenus à partir du règne végétal (bois, coton, etc....) ou du règne minéral (pétrole : quasi-totalité des matières plastiques) ainsi que le vernis qui est utilisé pour l'imprégnation de bobinage [20].

#### 7.1.2. Isolants gazeux :

Généralement dans le domaine de l'haute tension ; on emploie souvent un gaz comme diélectrique, tel que les lignes aériennes et les disjoncteurs. Le développement de la technique de l'isolement gazeux a pris un grand pas dans le domaine industriel lié à l'élévation des tensions et de

courants utilisés dans les grands réseaux de distribution. (Pour ce type de d'application.) Les gaz les plus utilisées sont :

- Air, azote, gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)

### 7.1.3. Isolants solides :

Les isolants solides trouvent des applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution d'énergie électrique. On les regroupe en deux catégories principales selon leur nature.

- **Naturel** : comme le papier, cartons, céramique et le caoutchouc.
- **Synthétique** : comme les matières plastique ainsi que les polymères.

### 7.1.4. Isolants mixtes :

L'isolation mixte est un mélange entre les isolants liquides et les isolants solides de tel sorte que les liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs, réactances, condensateurs, câbles etc.... [1].

## 8. Poly chlorure de vinyle (PVC) :

PVC (poly chlorure de vinyle) ou (poly vinyle chloride), découvert en 1835 et utilisé à l'industrie en 1926, est un polymère linéaire recyclable de grande consommation obtenue par polymérisation de chlorure de vinyle est composé de carbone, et de chlore. Le carbone et l'hydrogène proviennent du pétrole (43%) tandis que le chlore provient de sel (57%) et peut se fabriquer dans de multiples finitions et couleurs.

C'est le troisième polymère le plus employé dans le monde et représente 20% de la consommation et presque présent dans tous les secteurs économiques (bâtiment, emballage, électricité, santé et transport) [24] [25].

### 8.1. Formule :

Le PVC, s'agit du chlorure de vinyle monomère (CH<sub>2</sub>-CH-CL) qui est obtenue par la polymérisation radicalaire. Une molécule de PVC contient 750 à 1500 monomères.

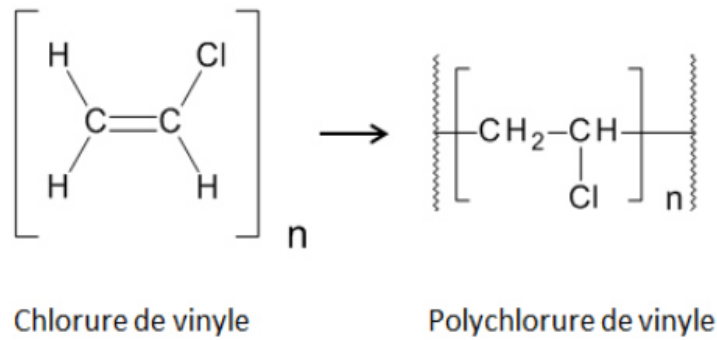


Figure 2.10: Formule de PVC.

### 8.2. Fabrication du PVC :

Le PVC est produit par la polymérisation du monomère de chlorure de vinyle (VCM), est composé à 57 % de chlore et de 43 % d'éthylène, hydrocarbure composé de carbone et d'hydrogène issu du pétrole. Les principaux procédés de polymérisation comprennent la polymérisation en suspension, en émulsion, et en masse. Environ 80% de la production utilise la polymérisation en suspension. Tout d'abord, le VCM est mis sous pression et liquéfié, puis introduit dans le réacteur de polymérisation, qui contient à l'avance de l'eau et des agents de suspension. Ensuite, l'amorceur est introduit dans le réacteur, et le PVC est produit sous quelques bars et à 40 – 60°C. Le rôle de l'eau est d'enlever et de contrôler la chaleur dégagée dans le processus de polymérisation. Le PVC forme des minuscules particules qui croissent et, lorsqu'elles atteignent la taille souhaitée, la réaction est arrêtée et tout le chlorure de vinyle qui n'a pas réagi est éliminé par distillation et réutilisé. Le PVC est séparé et séché pour former une poudre blanche également connu sous le nom de résine de PVC (figure2.11). La polymérisation est la réaction chimique par laquelle les molécules s'additionnent les unes aux autres pour former une chaîne de grande longueur [26].

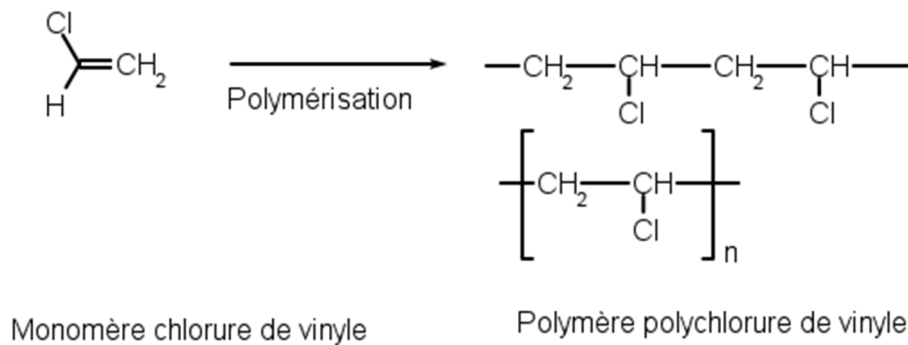


Figure 2.11 : Polymérisation de PVC .

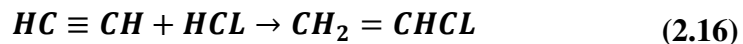


### 83. Synthèse de monomère :

La synthèse du chlorure de vinyle monomère (VCM) est réalisée suivant deux principaux procédés :



- Addition du gaz chlorhydrique sur l'acétylène :



- Chloration de l'éthylène en 1,2- dichloro éthane :



Puis pyrolyse de ce dernier :



### 8.4. Formes de PVC :

Le PVC se présente sous formes de :

- **PVC rigide** : il sert à la fabrication de profilés qui seront utilisés pour de futures fenêtres, portes, baies, etc. et tubes extrudés. Ce PVC a un aspect lisse. A titre indicatif, ce sont les tuyaux de canalisation qui représentent la plus grosse part de la production de PVC (plus de 40%).
- **PVC souple** : on le retrouve dans les revêtements, textiles, plafonds tendus. Mais également sur les manches d'outils. Son aspect est brillant.
- **PVC plastifié** : il est commercialisé sous forme de bobines et est utilisé en films adhésifs ou emballages. Un exemple de la vie courante : le film étirable.
- **PVC expansé ou Forex** : il sert à produire des enseignes commerciales [27].

### 8.5. Propriétés du PVC :

#### 8.5.1. Propriétés physico-chimiques :

- La masse volumique des compositions de PVC varie entre 1 et 2  $g/cm^3$  à la température ambiante.

- Le PVC transmet mal la flamme, mais sa combustion entraîne le dégagement de gaz corrosifs et de fumées.
- Thermiquement, il vieillit bien. Plusieurs chercheurs ont apporté leurs contributions à l'étude de vieillissement thermique du PVC.
- Il résiste au fluage à température élevée mais il reste fragile aux basses températures.
- Le PVC rigide résiste bien aux agents chimiques inorganiques, et il est soluble dans les cétones, le cyclohexanone et le dichloroéthylène.
- Le PVC plastifié sensible à certains agents chimiques tant que hydro-aromatique et Le PVC non plastifié ont une excellente résistance à de nombreux produits chimiques ainsi qu'aux acides et aux huiles etc....
- La température de transition vitreuse du PVC est élevée, elle se situe entre 75°C et 80°C ce qui le rend impropre à de nombreuses applications (câbles par exemple) sans l'adjonction de plastifiants. Avec l'emploi de plastifiants, la température de transition vitreuse se situe entre - 10°C et -5°C [19] [28] [29].

### 8.5.2. Propriétés électriques :

Le PVC a de bonnes propriétés isolantes mais les pertes électriques dans le matériau sont suffisamment importantes pour permettre le soudage par haute fréquence.[30].

### 8.5.3. Propriétés thermiques :

- Conductivité thermique : elle est d'environ  $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .
- Capacité thermique massique : elle est d'environ  $1046 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .
- 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.
- Température de ramollissement Vicat : La température de ramollissement pour les PVC non plastifiés se situe entre 65 et 85 °C. Pour des mélanges de PVC et de PVC chloré, elle peut atteindre des valeurs supérieures à 100 °C.
- Température de fléchissement sous charge : elle ne s'applique qu'aux PVC non plastifiés. Elle varie de 55 à 70 °C selon les formulations et peut atteindre 90 °C pour celles contenant du PVC chloré. [31]

### 8.6. Recyclage de PVC :

Le PVC est la seule matière plastique d'usage courant qui soit constituée de plus de 50% de matières premières d'origine minérale (sel) et dont la source est considérée comme inépuisable.

## Chapitre 2 : Matériaux diélectriques et PVC

De ce fait, sa part d'énergie fossile non renouvelable (les dérivés pétroliers) et donc son impact environnemental sont limités comparativement à d'autres polymères.

C'est encore plus le cas, lorsqu'il est recyclé car le PVC est un matériau recyclable. Il faut savoir que la totalité des matières plastiques utilisées dans le monde ne représente que 4 % du pétrole extrait annuellement. De son côté, le PVC n'équivaut qu'à 0,6 % de la consommation mondiale de pétrole actuelle.

En 2018, dans l'Union Européenne plus la Norvège et la Suisse, le recyclage a porté sur 739 525 t. Origine du PVC recyclé [32].

<b>TYPE DE PVC RECYCLE</b>	<b>POURCENTAGE %</b>
<b>PVC Souple</b>	<b>45</b>
<b>Câbles</b>	<b>21</b>
<b>Profile de fenêtres apparentes</b>	<b>21</b>
<b>Tuyaux et raccords</b>	<b>11</b>

Tableau 2.2 : Pourcentage de PVC recycle en 2018

### 8.7. Usages et applications du PVC :

Il est juste de dire que nous vivons, à l'heure actuelle, dans un environnement de matière plastique, puisque nous les trouvons, sous forme de biens de consommation, dans tous les domaines de :

1. Vêtement et textiles : sous-vêtement en nylon, survêtements: plus en acrylique, imperméables en nylon.
2. Maroquinerie et chaussure : sacs, valise en simili cuir, chaussures en simili cuir imperméables en nylon.
3. Ameublement : matelas en mousse polyester, tapis, coussins doublés de mousse.
4. Jouet, sport : poupées, jouet de plage, montre incassables.
5. Emballage : alimentaire : bouteilles de lait, pots de yaourt.
6. Industriel : emballage de pièces industrielles.
7. Transports : citernes routières, feux de position, tapis de voiture.
8. Industrie électrique lourde et électrodomestique : planche de tableau en bakélite, composants pour radio, corps et aspirateurs.

9. Industrie chimique : revêtement de cuves, cuves de stockage.

10. Bâtiment : revêtement de sols et dalles, toitures et bardage, peinture extérieures et intérieures.

11. Agriculture : tubes d'irrigation et de drainage, bacs à fleurs, bancs de jardin.

12. Hygiène : biberonnons incassables, seringues stériles a jeté [33]

### 8.8. Utilisation de PVC pour le transport d'électricité :

- **Câbles électriques :**

Le PVC est considéré comme l'un des plus polyvalents parmi les municipalités thermoplastiques. Utilisé comme matériau de base pour couvrir la surface des câbles électriques, il est particulièrement adapté à la construction de systèmes d'énergie électrique constitués de câbles rigides, durables et résistants à tout type de température. Les câbles avec revêtement en PVC sont donc idéaux pour une utilisation en extérieur et sont spécialement conçus pour permettre à l'installateur de réaliser à la fois l'installation et les chemins de câbles.

Les câbles avec des couvertures de PVC ou l'isolation sont :

- Retardateurs de flamme
- Résistant à divers produits chimiques, y compris les huiles, les acides et les alcalis.

Compte tenu de leur légèreté, les couvercles en PVC doivent être utilisés en toute connaissance de cause et situés dans des zones non soumises à des chocs ou des pressions excessives. De plus, comme les revêtements en PVC ne garantissent pas une grande résistance à la chaleur, il est conseillé de ne pas les utiliser dans des zones exposées à des températures élevées.

[34]

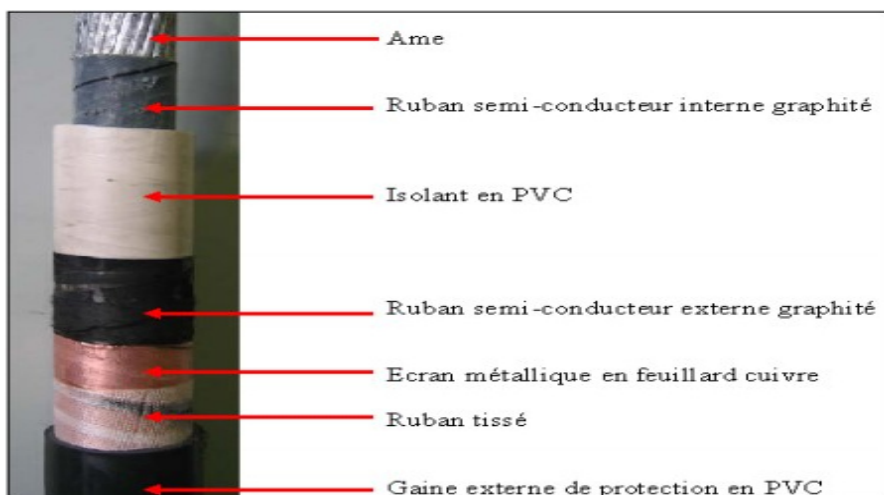


Figure 2.12 : Structure type d'un câble unipolaire à isolation PVC.

### 9. Effet des dopants sur les propriétés des polymères :

Le dopage en général, entraîne la modification de la structure de la molécule (géométrie) et par conséquent la modification des propriétés électroniques (conductivité) et optiques (couleur) des polymères. Il existe deux principales méthodes de dopage des polymères conducteurs, toutes deux se basent sur une oxydo-réduction.

#### 9.1. Dopage chimique :

Les polymères peuvent être dopés par l'ajout d'un réactif chimique qui oxyde (ou réduit) le système, ce qui fait transiter les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, rendant ainsi le système plus conducteur. Le dopage chimique, consiste à exposer le polymère, par exemple, une pellicule de mélanine, à un oxydant (de l'iode ou du brome) ou à un réducteur (très rare, ce qui implique l'utilisation de métaux alcalins).

#### 9.2. Dopage électrochimique :

La seconde méthode, appelée dopage électrochimique, utilise une électrode recouverte d'un polymère et immergée dans une solution électrolytique dans laquelle le polymère est insoluble. On applique une tension entre les électrodes qui provoque un mouvement des ions de la solution et des électrons qui se fixent alors sur le polymère traité, ou s'en échappent. On obtient ainsi un excès (dopage N) ou un défaut (dopage P) d'électrons au niveau de la bande de conduction du polymère.

Cette méthode est une des plus efficaces, mais surtout celle qui bénéficie du plus de recherches : le dopage N, qui ne peut se produire en présence d'oxygène, est plus facile à effectuer : on peut éliminer l'oxygène dans le milieu électrolytique avec des moyens convenables. [35]

### 10. Avantages et les inconvénients de PVC :

Les avantages de PVC	Les inconvénients de PVC
Très économique	Transformation délicate et peut provoquer une dégradation rapide du matériau
Résistant aux intempéries, à l'usure du temps, aux flammes et à la plupart d'agents Agressifs	Toxique en cas d'incendie ou de combustion (contient de l'acide chlorhydrique)
Bonne résistance chimique	Resistance chimique limitée aux solvants
Insensible aux variations climatiques	Non biodégradable

## Chapitre 2 : Matériaux diélectriques et PVC

Bon isolant électrique, thermique et phonique	Sensible au feu
Malléable, le pvc se plie à toutes les contraintes	Aspect plastique des produits d'imitation (bois, marbre, etc...)
Collage facile	Faible résistance mécaniques
Difficilement inflammable	Ne résiste pas à la chaleur $> 70^{\circ} C$ et à la stérilisation par les rayonnements ionisants.
Antichoc	Produit à base de pétrole

Tableau 2.3 : Avantages et inconvénients de PVC

### 11. Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté chaque isolant et diélectrique et l'ensemble des caractéristiques des diélectriques (rigidité, conductivité, facteur de perte et permittivité) ainsi que la classification des isolants. Dans la deuxième partie, nous avons traité l'un des matériaux isolants (Polychlorure de vinyle) formulation et fabrication, ses caractéristiques, telles que son utilisation dans le transport électrique, nous terminons avec certaines de ses avantages et inconvénients. Dans le chapitre suivant nous allons traiter le concept de vieillissement des matériaux électriques (électrique, thermique,..) et on conclue par les types de claquages.

# Chapitre 3:

## vieillissements des matériaux polymères

### 1. Introduction :

Sous l'influence de toutes les contraintes d'exploitation (champ électrique, température, sollicitation mécanique, rayonnement...), les performances des matériaux isolants résistants aux sollicitations électriques vont évoluer dans le temps. Comme tout changement dans les propriétés du matériau qui affecte sa fonction isolante. Par conséquent, il peut être modifié chimiquement ou physiquement, provoquant une modification des caractéristiques électriques dans un sens qui n'est pas propice à la durabilité de la fonction d'isolation. Evidemment, la durée de vie d'un matériau diélectrique dépend de la force de la contrainte électrique qu'il supporte, et elle dépend aussi de la durée de la contrainte. La durée de vie dépend également de la configuration des contacts électriques, qui contrôle en partie les phénomènes de décharge et d'injection de charges pouvant être liés à des mécanismes de dégradation. Le vieillissement électrique est un gros problème pour l'industrie, car tous ces paramètres sont clairement hors de contrôle [38].

### 2. Vieillissement :

Pour les scientifiques, le concept de vieillissement est très spécifique et inévitable. Le concept de vieillissement décrit un ou plusieurs changements fonctionnels qui réduisent progressivement la capacité des objets, des informations ou des organismes à remplir leurs fonctions. Le vieillissement est le développement lent et irréversible (dans les conditions d'utilisation) d'une ou plusieurs des propriétés du matériau considéré [38].

Dans le domaine qui nous concerne, c'est le vieillissement des isolants électriques organiques qui nous intéresse. En effet, sous l'action de nombreux facteurs (champ électrique, température, humidité, radiations...) les propriétés de ces isolants se dégradent dans le temps de manière réversible ou irréversible. Ce phénomène présente des effets défavorables pour le matériel électrique pouvant se manifester par l'apparition de défaillances associées à des phénomènes de rupture et de décharges diélectriques des isolants et ceci, sous des contraintes bien plus faibles que celles prises en compte à la conception.

La compréhension des mécanismes et des phénomènes de vieillissement conduisant soit à la perte, réversible ou non, des propriétés fonctionnelles, soit à la rupture diélectrique des isolants organiques solides doit pouvoir permettre de prédire le comportement de ce type de matériaux en

tenant compte de la durée d'utilisation envisagée pour le système en question (30 à 40 ans par exemple pour les câbles de transport d'énergie ou les alternateurs [39]).

### 2.1. Modes de vieillissement :

La dégradation est affectée par les paramètres environnementaux et se déroule en une ou plusieurs étapes, on distingue 3 types de vieillissements : physique, thermique et électriques.

#### 2.1.1. Vieillissement physique :

Le vieillissement physique est un phénomène qui ne touche que la partie amorphe du matériau [40]. Ce type de vieillissement correspond à tout processus conduisant à une modification des propriétés d'utilisation du matériau sans qu'il y ait modification de la structure chimique de ce dernier. Il englobe les phénomènes de vieillissement sous contrainte mécanique, les phénomènes de relaxations, les phénomènes liés au transfert de masse (pénétration de solvants, migration d'adjuvants) et les phénomènes de surface [41].

#### 2.1.2. Vieillissement thermique :

La relaxation structurale d'un polymère est uniquement liée à des causes internes au matériau, c'est-à-dire, au fait que le matériau soit, au terme de sa mise en œuvre, dans un état thermodynamique instable (déséquilibre thermodynamique). Le vieillissement physique résulte donc d'une évolution plus ou moins lente vers un état plus stable. En effet, lors de sa mise en œuvre, le polymère semi-cristallin passe d'un état fluide caractérisé par une grande mobilité de ses chaînes macromoléculaires, à un état solide, donc avec une très faible mobilité moléculaire. Ce passage étant brutal par rapport à l'échelle de temps moléculaire, les changements de configuration du réseau macromoléculaire nécessaires pour atteindre l'équilibre thermodynamique deviennent alors trop lents pour que l'équilibre puisse être atteint dans l'échelle de temps imposée par la vitesse de refroidissement. Ceci entraîne une situation instable et se traduit par l'augmentation de l'énergie du système. Les chaînes moléculaires tentent à revenir vers un état plus stable (relaxation). Ce phénomène est limité par la faible mobilité des chaînes : l'atteinte de l'état d'équilibre dans ces conditions est donc un phénomène lent [25].

#### 2.1.3. Vieillissement électrique :

En plus de l'ensemble des vieillissements abordés précédemment, un matériau isolant soumis à une contrainte électrique peut également voir ses propriétés changer avec le temps du fait de cette contrainte. Au sens du génie électrique, le vieillissement électrique est défini comme tout changement des propriétés du matériau qui affecte ses fonctions électriques. Il peut donc s'agir



d'une modification de nature chimique ou physique induisant une modification des propriétés électriques dans un sens défavorable pour la pérennité des fonctions isolantes. Évidemment, la durée de vie d'un matériau diélectrique dépend de l'intensité de la contrainte électrique subie par celui-ci, mais également de la durée d'application de cette contrainte. Cette durée de vie dépend également de la configuration des contacts électriques qui contrôlent en partie les phénomènes de décharges électriques et d'injection de charges qui peuvent être impliqués dans les mécanismes de dégradation [25].

### 3. Les phénomènes électriques :

#### 3.1. Une décharge partielle :

Une décharge partielle est une décharge disruptive survenant dans l'isolement. Elles apparaissent dans les diélectriques solides, liquides ou gazeux présentant des défauts (cavité, décollement...) dès qu'une tension suffisante est appliquée. Les décharges partielles (DP), telles que définies par la norme CEI 60270, sont des décharges diélectriques localisées dans une partie d'un système isolant diélectrique solide ou liquide sous l'effet d'un champ à haute tension. Dans le domaine de l'électricité, une décharge partielle (DP) est une décharge qui ne court-circuite que partiellement l'isolement entre conducteurs sous l'effet d'une forte tension (HTB ou HTA).

Les décharges partielles, se manifestent soit à l'intérieur des bulles gazeuses emprisonnées dans la structure isolante (les bulles gazeuses peuvent également prendre naissance sous l'effet de la tension dans une isolation imprégnée de liquide isolant tel que le transformateur), soit à la frontière entre isolant et conducteur lorsque l'adhérence n'est pas parfaite, soit dans des cavités ou inclusions de particules étrangères. Dès que le champ est suffisant, les décharges partielles prennent naissance et peuvent par érosion, fusion localisée, transformation chimique créent dans l'isolant des réseaux de canaux plus ou moins conducteurs sous formes d'arbustes (formation d'arborescences), ces derniers croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leurs tailles deviennent suffisamment grandes [42].

##### 3.1.1. Effet couronne :

Est un phénomène de décharge électrique partielle entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur. Il apparaît quand le champ électrique dépasse une « valeur critique » (mais dont les conditions ne permettent pas la formation d'un arc). Il se manifeste par l'apparition de points lumineux bleuâtres (sur certaines aspérités métalliques) ou lignes lumineuses ou parfois

d'une longue « gaine lumineuse » qui se forme autour des câbles (conducteurs aériens le plus souvent) transportant du courant sous haute tension [43].



Figure 3.1 : l'effet couronne

### 3.1.2. Application de la décharge couronne :

La décharge couronne présente des aspects utiles recherchés pour ses nombreuses applications : Dépôt de charge en reprographie, traitement de surfaces métalliques et isolantes, textiles, applications biologiques, séparateur électrostatique, dépoussiéreur électrique, neutralisation, production d'ozone, ...etc.

Et des aspects nuisibles : pertes d'énergie dans les lignes de transmission, perturbations radioélectriques, défaut d'isolement, l'apparition de phénomène de corrosion, photocopieur, laser à azote, refroidissement de composants électroniques, coloration des véhicules etc.... [43.44].

### 3.2. Charge d'espace :

Les isolants électriques n'ont jamais un comportement idéal. En effet, ils ont une tendance à se charger électriquement par le biais de différents mécanismes de formation et de transport de charges. On appelle « charge d'espace » l'ensemble des charges positives ou négatives dans le diélectrique. De plus, on peut distinguer les charges dites intrinsèques qui sont des charges présentes initialement au sein du diélectrique lui-même ou créées par électro dissociation d'espèces neutres des charges dites extrinsèques qui sont des charges injectées depuis les électrodes vers l'isolant tels que les électrons ou les trous [45].

#### 3.2.1. Origines des charges d'espace :

Les charges d'espace apparaissent dans les matériaux à faible conductivité électrique, comme les isolants. Idéalement, un isolant dispos d'une maille cristalline sans défaut et d'une pureté parfaite, de telle façon que la seule source de charges internes soit les atomes du réseau. Cependant, pour la grande majorité des isolants, un tel matériau n'existe pas puisque :

- Il existe toujours des sources de charges autres que les atomes constitutifs de l'isolant (impuretés, additifs) ;

- La structure des matériaux n'est jamais totalement parfaite ; elle peut comporter des phases cristallines, semi-cristallines ou amorphes ou encore des défauts ponctuels ou étendus ;
- La présence d'impuretés entraîne la présence de charges d'espace [25].

### 4. Le claquage des isolants :

Les défaillances électriques du matériel électrique sont dues, dans une très large mesure, au claquage électrique des isolations. On désigne ainsi l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles où tout milieu diélectrique (liquide, gaz, solide) est soudainement traversé par un arc.

#### 4.1. Dans les isolants solides :

C'est un phénomène qui se produit dans un isolant quand le champ électrique dépasse ce que peut supporter cet isolant. Le claquage peut provoquer la fonte, brûler ou perforer le diélectrique et les électrodes et il peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant. Si on applique une tension de nouveau à cet isolant, un claquage se produit dans la majorité des cas par un très intense faisceau lumineux produit par un laser (suivant le canal tracé par la décharge.).

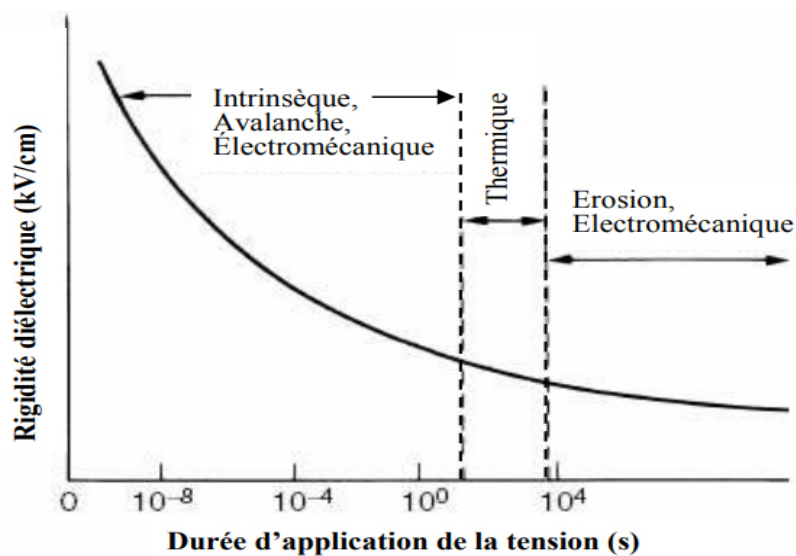


Figure 3.2 : Différents types de claquage des isolants solides

#### 4.2. Dans les isolants liquides et gazeux :

Si le pré claquage apparaît dans les diélectriques liquides ou gazeux, la mobilité des particules permet d'éliminer la trace et l'isolant peut être régénéré (si le claquage n'a pas eu lieu pendant une durée assez grande pour changer les propriétés intrinsèques de l'isolant).

Chaque matériau possède une rigidité diélectrique différente des autres. Elle dépend de :

- Fréquence du réseau : si la fréquence augmente la rigidité diélectrique diminue ;
- Température : la rigidité diélectrique est inversement proportionnelle à la température ;
- Temps d'application de la tension [46].

### 4.3. Caractères généraux du claquage :

- **Brusque** : Le claquage diélectrique est un phénomène qui apparaît brusquement. Le temps de formation est souvent inférieur à la microseconde.
- **Irréversible** : Le claquage possède un caractère irréversible. Tant que la tension reste appliquée, même réduite l'état conducteur persiste.
- **Non reproductible** : Les mesures de champ de claquage faites dans les mêmes conditions semblables que possible donnent des valeurs très dispersées
- **Localisé** : Le claquage est un phénomène localisé qui n'affecte qu'une partie de l'isolant. La partie saine conserve ses propriétés isolantes.
- **Dépendant de plusieurs paramètres physiques** : Le claquage diélectrique dépend de paramètres physiques comme la température, la pression, la tension et son temps d'application, la conductivité électrique et/ou thermique, la pureté du matériau, la nature des électrodes et leur géométrie, etc.... [47].

### 4.4. Différents Mécanismes de claquage :

Pour les appareils fonctionnant sous haute tension, le diélectrique est un élément délicat. Trois mécanismes principaux décrivent la détérioration globale du diélectrique sous le champ électrique :

- a) Le vieillissement électrique,
- b) La dégradation d'un matériel
- c) La rupture diélectrique

Il existe deux types de rupture à court et à long terme :

- **Rupture à court terme** :

Lorsqu'un polymère est soumis à un champ électrique croissant on constate expérimentalement que les temps de rupture restent inférieurs à la minute.

Il existe deux groupes de théories dans le domaine de la rupture à court terme, à avoir la rupture électrique et la rupture thermique. Le stade ultime de tout mécanisme de rupture est un processus thermique. Ce sont les mécanismes initiateurs de rupture qui provoquent l'accroissement de la conductivité qui sont différents :

- Dans le cas de la rupture d'origine thermique, l'augmentation initiale de la conductivité est provoquée par une élévation locale de la température.
- Dans le cas de la rupture d'origine électrique, divers processus qui dépendent directement de la valeur du champ électrique sont à l'origine de l'augmentation de la conductivité.

- **Rupture à long terme :**

Il est difficile de faire une distinction entre le claquage à court terme et le claquage à long terme. Il n'est pas aisé de définir cette frontière temporelle. Dans le cas de la rupture à long terme, on parle plutôt de vieillissement électrique du matériau. La rupture à long terme peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années [1].

Le problème de la rupture se résumant à un transfert d'énergie entre le champ électrique et les porteurs de charge, une théorie de rupture à long terme doit expliquer comment sous un champ relativement faible, les porteurs peuvent gagner l'énergie de quelques électrons-volts nécessaire à la rupture des liaisons dans un isolant. Un modèle a été développé par Jonscher et Lacoste qui s'applique aussi bien à la rupture aux temps courts qu'aux temps longs [48].

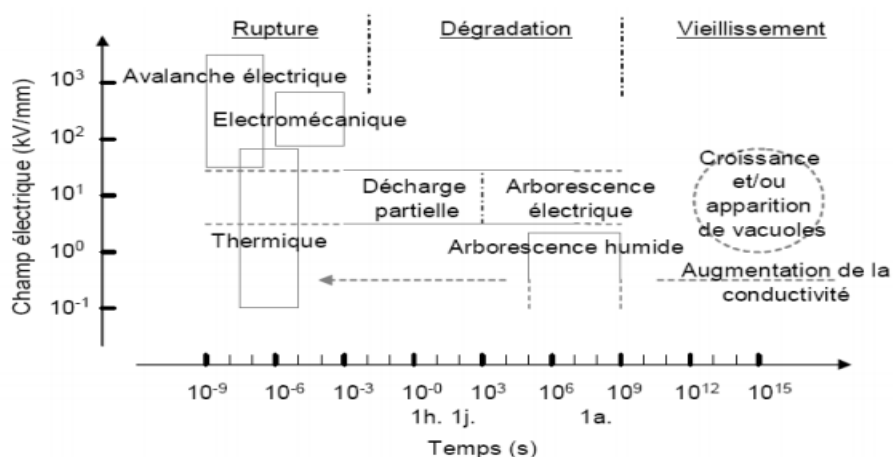


Figure 3.3 : Vieillissement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et de champs électriques Auxquels ces mécanismes ont lieu [49].

### 4.5. Types de claquage :

#### 4.5.1. Claquage thermique :

Les pertes diélectriques de polarisation et de conduction provoquent un dégagement de Chaleur dans les isolants. Tant que la quantité de chaleur ainsi produite est supérieure à celle que peut évacuer l'isolant, la température augmente. Avec elle, la conductivité augmente entraînant un accroissement de la chaleur produite par effet Joule. La chaleur dégagée par les pertes diélectriques de polarisation augmente également.

Le fait que la rigidité diélectrique décroisse quand la température augmente favorise l'apparition du claquage thermique. Parfois, celui-ci est précédé de la décomposition chimique ou de la fusion de l'isolant [50].

### 4.5.2. Claquage électromécanique :

La théorie du claquage électromécanique prend en compte l'effet électrostatique qui tend à rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cette théorie étant introduite par Stark et Graton. L'effort comprime l'isolant solide placé entre les deux électrodes. Le claquage survient lorsque cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau [50].

### 4.5.3. Claquage électronique :

Plusieurs théories ont été proposées. On distingue le claquage intrinsèque et le claquage par avalanche.

#### A. Claquage intrinsèque :

Lorsque le champ électrique appliqué à un matériau de telle manière que sa température reste pratiquement inchangée en maintenant ce champ pendant une courte durée et en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur, on peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température c'est ce qu'on appelle le claquage intrinsèque [51].

#### B. Claquage par avalanche :

La condition nécessaire mais non suffisante pour que ce type de claquage se produise est la présence dans la matière isolante d'électrons de conduction pouvant être accélérés pour atteindre l'énergie d'ionisation des atomes (soit 5 à 10 eV). Coelho et Aladenize donnent une explication du processus, lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un électron, de sorte qu'on a alors deux électrons libres qui peuvent acquérir avec le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc deux électrons et ainsi de suite [11].

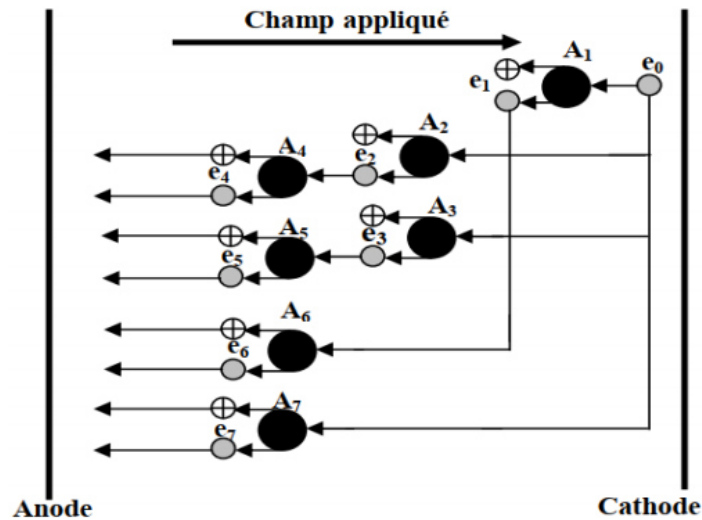


Figure 3.4 : Schéma descriptif de l'avalanche

Pour produire une avalanche, il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit 2 électrons, une avalanche de  $m$  générations donne  $2^m$  électrons. Fournie a montré que la destruction du matériau par avalanche électronique nécessite 40 générations soit 240 électrons ( $\approx 10^{12}$ )

#### 5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques vieillissements qui affectent sur l'état des diélectriques. Nous nous sommes intéressés à la définition et les type de chaque vieillissement, ainsi que les différents mécanismes de claquage.

Les résultats de ces vieillissements seront détaillés dans le chapitre suivant.

## Conclusion général

L'objectif de notre travail était l'étude de l'influence du temps de vieillissement électrique sur les propriétés diélectriques du PVC Vierge et dopé utilisé dans l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique dans le domaine fréquentiel, ainsi l'influence des dopants sur ces paramètres.

Dans la partie expérimentale de notre travail, nous avons décrit en détails la préparation des échantillons ainsi que les dopants utilisées puis on a cité les étapes suivies pour le vieillissement électrique et le montage expérimental utilisé, ainsi que les étapes de la caractérisation par un RLC mètre, qu'on a mesuré quelques paramètres diélectriques durant des périodes différentes (0h, 1h, 2h, 3h) de vieillissement en fonction des différentes gammes de fréquence et on a remarqué que le temps de vieillissement et la fréquence influe sur les propriétés diélectriques mesurer du PVC.

L'augmentation des durées de vieillissement engendre une augmentation du facteur de dissipation ainsi que les pertes et la diminution de la permittivité relative diélectrique ceci dénote la dégradation de matériau.

Toutefois bien que le gainage des câbles électriques en PVC présente des avantages sérieux, il n'en demeure pas moins que ce matériau présente certains inconvénients qui est la présence des vacuoles au cours de l'élaborations du matériau au laboratoire qui provoque l'augmentation des pertes ainsi que le facture de dissipation, pour cela nous avant ajouter des dopants ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) au PVC, les substances de ces derniers remplissent les vacuoles de la matrice mère (PVC vierge), et diminue par conséquent le facteur dissipation et les pertes diélectriques.

Notre travail montre que le  $\text{BaTiO}_3$  est le meilleur dopant par rapport aux autres, ceci explique que les dopants améliorent les paramètres diélectriques du matériau et par conséquent leurs durées de vie.

Nous avons souhaités de faire un claquage électrique des échantillons à l'université de Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou et voire sa tension de claquage, mais ce n'est pas possible à l'air libre, puisque il y a le problème du contournement qui précède le claquage lors de la décharge électrique.



## Références bibliographiques

- [1] K.SMILI, « Etude des propriétés diélectriques des matériaux isolants soumis à des champ très intense », Thèse de Doctorat, 2018.
- [2] ANONYME, 2000.
- [3] B.LASSAS, « Influence du vieillissement thermique et chimiques sur les propriétés du PVC utilise dans un mélange de gainage pour câbles électriques », Thèse présentée pour l'obtention du Garde de Magister, Université Houari Boumediene ,20juin 2002.
- [4] W.GHORZI, « Etude de la diffusion des molécules de de basipodes les réseaux de polymères acryliques », Mémoire Master université Abou Bekrbelkaid, Tlemcen, Algérie 2011-2012.
- [5] P.WEISS, « Chimie des polymères » société francophone de biomatériaux dentaire, université médicale virtuelle francophone.2009-2010.
- [6] Y.ZHAO, « Chimie des polymères »université de Sherbrooke, faculté des sciences département chimie, CHM504.
- [7] H.KAUSH et autres, « Propriétés mécaniques et physiques »livre, p4, 2001.
- [8] H.ARCOSTANZO et autre, « Chimie », Livre, p383.
- [9] A.GUIDOUM et autres, « Polymères », cours GC 1<sup>er</sup>2012/2013.
- [10] S.JOUENNE, « Option chimie et physicochimie des polymères », Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Cure ,2005 .
- [11] Chapitre1, « Notions fondamentales sur les polymères ».
- [12] S.BOUZID, « Détermination de la constante temps de gonflement de réseaux des polymères interpénètre », Université Abou-bekrbelkaid, Tlemcen, Algérie, 20/06/2016.
- [13] M .HANDALA, « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50Hz effets sur une interface isolante air/solide », Thèse de Doctorat, Tizi-Ouzou.
- [14] MN.MEBAREK, S.BOUGDAD, « Influence du composite BaTiO<sub>3</sub> sur les propriétés diélectriques de PVC (application sur l'isolation des câbles de transport d'énergie) », Mémoire Master Université AMO, Bouira, 2016.
- [15] A.BOUCHENAK, « Etude comparative du poly méthacrylate de méthyle(PMMA) soumis aux différents vieillissements », Mémoire Master, Université Akli Mohendoulhadj à Bouira
- [16] N.MANSOURI, « Structure des polymères et leurs classifications ».
- [17] K.MAHTOUT, « Modélisation numérique d'un intervalle pointe barriere-plan », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2014.
- [18]:M.BOURKBA, « Etude des caractéristiques des matériaux Isolants par la méthode de DPS », Mémoire master, Université du Badji Mokhtar à Annaba, 2019.

## Références bibliographique

---

- [19] J.P. Crine, «Molecular model to evaluate the impact of aging space charges in polymer dielectrics», IEEE, Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation», Vol. 4, N° 5, pp. 487- 495, October 1997
- [20] A. TILMITINE, « Les diélectriques », chapitre7.
- [21] B.AMIDOU, « Contribution à l'amélioration de l'interprétation des techniques des transformateurs de puissance par spectroscopie diélectrique », Mémoire présenté à Université du Québec à Chicoutimi, décembre 2012
- [22] M.SAIDI, « Effet de dopage d'élément sur les propriétés diélectriques et piézoélectrique de la composition (Na Bi)(BaTio3)synthèse par technique Sol-Gel », Mémoire Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,12/09/2012.
- [23] <https://illustrationprize.com/fr/71-difference-between-dielectric-amp-insulator.html>; Consulté le : 13/08/2021.
- [24] A.HASCOAT, « Étude et modélisation du vieillissement sous contraintes électrothermique de l'isolant pour câble de transport d'énergie haut tension à courant continu, Thèse Doctorat de l'Université Montpellier,16/12/2016.
- [25] R. REZGUI, D. REZGUI. « Influence des fibres naturelles sur les propriétés mécaniques et dynamique des composites à base de pvc (cas DPL noix d'olives) », Mémoire Master. Université de Biskra, En 04/06/2019.
- [26] <https://leleme.tarium.fr/product/pvc/>; Consulté le 5/8/2021
- [27] <https://guichon-vannes.com/faqs/pvc-process-de-fabrication-du-polychlorure-de-vinyle-pvc/>; Consulté le 5/8/2021
- [28] <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/batiment-pvc-10875>; Consulté le 9/09/2021
- [29] D. Srivastava, P. Kumar, G.N. Mathur, « Thermo-oxidative degradation studies of ternary blends of polyethylene », Advances in Polymer Technology, Vol. 23, N° 1, pp. 59-70, 2004.
- [30] B.Wojtkowaik, M. Chabanel, «Spectrochimie moléculaire», Technique&Documentation, 1983.
- [31] A.J. Peacock, Handbook of polyethylene: Structure, Properties, and Applications, New York: Marcel Dekker, 534, (2001).
- [32] D. Ausseur, polychlorure de vinyle, Technique de l'ingénieur, AM 3325, Paris, 1999, pag1-11.
- [33] <https://lelementarium.fr/product/pvc/>; Consulté le 13/9/2021.
- [34] Z.BENNAMIA, « modification chimique de poly (chlorure de vinyle)», Mémoire Master,4000M D'ENIP SKIKDA ,27/05/2015.
- [35] <https://lab.monplast.it/fr/cables-electriques-pvc-ppe-ce-quit-faut-savoir>; Consulté le 6/10/2021

## Références bibliographique

---

- [36] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, Ed. Peter Peregrinus Ltd « Electrical degradation and breakdown in polymers », London, 1992.
- [37] J.Verdu, « Vieillissement des plastiques », AFNOR technique, ed. A.F.d. Normalisation, Eyrolles, Paris, 1984.
- [38] C.LAURENT « Diélectriques solides et charge d'espace», Techniques de l'Ingénieur, Pack Génie Électrique, 1999, D 2 305, pp 1-13.
- [39] DONG ,2013
- [40] MALAJATI, 2009 ; KADDAR, 2014.
- [41] P .QUENNEHEN, « Étude de la dégradation de la fonction isolation de câbles HT isolés au pvc » Thèse de Doctorat, 13/6/2014.
- [42] J. C. Dubois, « Propriétés diélectriques des polymères » Techniques de l'ingénieur, traitée électrique, E1850, pp1-15, 2004.
- [43] D.K. Das-Gupta, « Electrical properties of surface of polymeric insulators » IEEE – Trans, on. Elect, Insu, Vol. 27, N°5, pp. 909-923, 1992.
- [44] A. BENYOUCEF, « Développement d'une technique de mesure de charge d'espace dédiée aux câbles aéronautiques destinés aux réseaux de bords HVDC », Le 9 mars 2021.
- [45] M.ABDELLAOUI « Contribution à l'Étude des phénomènes précurseurs au claquage diélectriques dans les polymères isolants », Mémoire Magister, 07/02/2009 .
- [46] A.MAHARBI, « Etude du comportement des films polymériques à base de polystyrène et des mélanges (PVC/PS), Mémoire de Master en chimie, Université de Biskra, 2013/2014.
- [47] D.BOUGDAD, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2009/2010.
- [48] L.GALLOT, « Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension. -177p. Th. : Génie Electrique : Toulouse : 2004.
- [49] D.BELKACEMI « étude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs» Mémoire Magister, juin 2012.
- [50] Z.AIT-SAAD, « vieillissement électrique du polyester-imide et du polyamide utilisés dans les machines électriques », Mémoire Magistère, 20/2/02/2011.