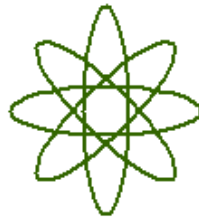
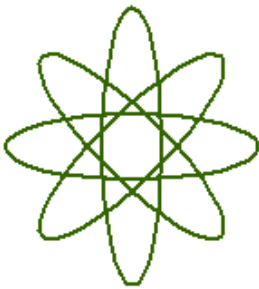


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique  
Université Mouloud MAMMERRI, Tizi-ouzou

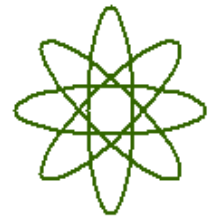


Faculté de Génie électrique et d'informatique  
Département d'Electrotechnique



# Mémoire

*de fin d'études*



EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
**D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE**  
OPTION: Réseaux Électriques

# Thème

*ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT  
ÉLECTRIQUE SUR LA CONDUCTION  
ÉLECTRIQUE DU  
POLYPROPYLÈNE (PP) ET DU POLYSTYRÈNE (PS)*

**Propose et dirigé par :**

**Mr. M. MOUDOUD.**

**Présenté par :**

**Mr. HOCINE BOUAZZA .  
Mr. LAZIZ MOUSLI.**



*Promenassions 2008/2009.*



# Remerciements

## Remerciements

*NOUS TENONS À EXPRIMER NOS PLUS VIFS REMERCIEMENTS À NOTRE PROMOTEUR **M<sup>r</sup>. MOUDOUD** POUR SA DISPONIBILITÉ, L'AIDE ET LES CONSEILS QU'IL NOUS A PRODIGUÉS TOUT AU LONG DE CE TRAVAIL, AINSI QUE **M<sup>r</sup>.MEKIOUS** POUR L'AIDE PRÉCIEUSE QU'IL NOUS A FOURNIE.*

*NOUS TENONS ÉGALEMENT À REMERCIER **M<sup>r</sup>. AKACHA** POUR SA DISPONIBILITÉ AU LABORATOIRE DE HAUTE TENSION.*

*NOUS VIFS REMERCIEMENTS VONT ÉGALEMENT À NOS FAMILLES ET TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ, DE PRÈS OU DE LOIN, À L'ABOUTISSEMENT DE CE TRAVAIL.*

*ENFIN NOUS TENONS À REMERCIER LE PRÉSIDENT ET LES MEMBRES DE JURY QUI NOUS FERONT L'HONNEUR DE JUGER NOTRE TRAVAIL.*



# Dédicaces Dédicaces

*JE DÉDIE CE PRÉSENT TRAVAIL À;*

*MES PARENTS, CEUX QUE J'AI DE PLUS PRÉCIEUX AU MONDE PRINCIPALEMENT POUR LEUR ÉNORME SOUTIEN FINANCIER ET MORAL ET QUI M'ONT PERMIS D'ARRIVER LÀ AU J'EN SUIS CE JOUR, JE VOUDRAI LEUR EXPRIMER TOUTE MA GRATITUDE ET TOUT AMOUR, JE LEUR DIS MILLE FOIS MERCI;*

*MON FRÈRE AHCENE ET MES SCEURS ET LEURS MARIS EN PARTICULIER HAKIMA ;*

*MA COPINE NADIA POUR SON SOUTIEN TOUT AU LONG DE CE TRAVAIL ET SA FAMILLE ;*

*MON BINÔME, MES AMIS, ET LEURS FAMILLES ;*

*AINSI À CEUX ET CELLES QUI M'ONT AIDÉ DE PRÈS OU DE LOIN À RÉALISER CE TRAVAIL.*

HOCINE.





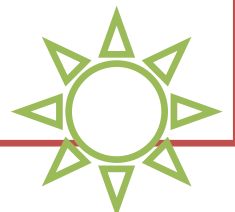
# Dédicaces

## Dédicaces

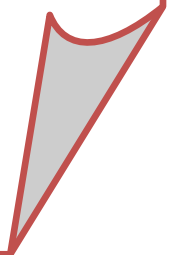
*JE DÉDIE CE PRÉSENT TRAVAIL À :*

- *MA GRANDE MÈRE ET MES PARENTS QUI M'ONT SOUTENU DURANT MON CYCLE D'ÉTUDE ;*
- *MES FRÈRES, MES SŒURS ET LE MARI DE MA SŒUR FATIHA ET SA FAMILLE ;*
- *MES COUSINS ET MES COUSINES ;*
- *LES FILLES DE MA TENTE ET LEURS FAMILLES ;*
- *MES ONCLES ET LEURS FAMILLES;*
- *MON BINÔME, MES AMIS ET LEURS FAMILLES ;*
- *AINSI À CEUX ET CELLES QUI M'ONT AIDÉ DE PRÈS OU DE LOIN À RÉALISER CE TRAVAIL,*

*LAZIZ.*



# SOMMAIRE.



# Sommaire

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les polymères.</b>	
I-1. Introduction.....	2
I-2. Différents types de polymères.....	2
a- Les homopolymères .....	2
b- Les copolymères.....	3
I-3. Polymérisation.....	4
I-3-1. Définition.....	4
I-3-2. Types de polymérisation.....	4
a- Polymérisation par addition.....	4
b- Polymérisation par condensation (polycondensation) .....	5
I-3-3. Procédés de polymérisation .....	5
a- En masse.....	5
b- En solution.....	5
c- En émulsion.....	5
d- En suspension .....	6
I-4. Présentation des deux matériaux PP et PS.....	6
I-4-1. Le polypropylène (PP).....	6
I-4-1-1. Définition .....	6
I-4-1-2. Caractéristiques de polypropylène.....	7
a- Caractéristiques physiques.....	7
b- Caractéristiques mécaniques.....	7
c- Caractéristiques thermiques.....	7
d- Caractéristiques électriques.....	7
I-4-1-3. Avantages et inconvénients.....	8
a- Avantages.....	8
b- Inconvénients.....	8
c- Domaine d'utilisation.....	8
I-4-2. Le polystyrène (PS).....	9
I-4-2-1. Définition .....	9
I-4-2-2. Caractéristiques du polystyrène.....	10
a- Caractéristiques physiques .....	10
b- Caractéristiques mécaniques.....	10
c- Caractéristiques thermiques .....	10
d- Caractéristiques électriques.....	11
I-4-2-3. Avantages et inconvénients.....	11
a- Avantages .....	11
b- Inconvénients.....	11
c- Domaines d'utilisation .....	11
I-5. Conclusion.....	12
<b>Chapitre II : Conduction électrique dans les diélectriques.</b>	
II-1. Introduction .....	13
II-2. Généralités.....	13
II-2-1. Conduction et structure des matériaux.....	13
II-2-1-1. Rappel sur la théorie des bandes.....	13
A- Définition .....	13

A- Les bandes d'énergie .....	13
B- Variation de l'énergie de Fermi $E_F$ avec la température.....	14
C- Définition du travail de sortie .....	15
D- Mobilité des charges (mobilité des porteurs).....	15
II-2-1-2. Courants de conduction, de diffusion et de déplacement et courant de polarisation	16
II-2-1-3. Définition du courant d'absorption et de réabsorption dans un isolant .....	17
II-3. Mécanismes de conduction dans les isolants .....	19
II-3-1. Mécanismes de conduction limitée par l'interface métal isolant .....	19
II-3-1-1. Effet thermoélectronique ou effet Schottky.....	20
II-3-1-2. Emission de champ (effet Fowler-Nordheim) .....	22
II-3-2. Mécanismes de conduction contrôlée par le volume du diélectrique .....	22
II-3-2-1. Courants limités par la charge d'espace .....	22
II-3-2-2. Effet Poole-Frenkel .....	26
II-3-2-3. conduction par saut (hopping) .....	27
II-2-2-4. Cas des courants non réversibles.....	28
II-4. Conclusion.....	29

## Chapitre III : Vieillessement des polymères.

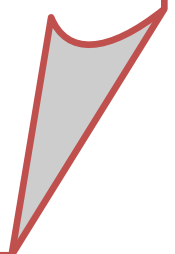
III-1. Introduction.....	30
III-2. Vieillessement des polymères.....	30
III-2-1. Vieillessement physique.....	30
III-2-1-1. Vieillessement physique avec transfert de masse.....	30
III-2-1-2. Vieillessement physique sans transfert de masse.....	31
• Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif .....	31
• Vieillessement par relaxation de volume et d'enthalpie.....	31
• Vieillessement par chocs thermiques.....	31
1) Gradient de température dans l'épaisseur.....	31
2) Matériaux hétérogènes .....	32
III-2-1-3. Influence du vieillessement physique sur les propriétés du polymère .....	32
III-2-2. Vieillessements chimiques .....	32
III-2-2-1. Oxydation .....	32
III-2-2-2. Hydrolyse.....	32
III-2-2-3. Coupure de chaînes statiques .....	33
III-2-2-4. Dépolymérisation .....	33
III-2-2-5. Réticulation .....	33
III-2-2-6. Vieillessement électrique .....	34
III-2-2-7. vieillessement climatique .....	34
III-3. Conclusion .....	34

## Chapitre IV : Partie expérimentale.

IV-1. Introduction.....	35
IV-2. Préparation des échantillons .....	35
IV-3. Montages expérimentaux .....	35
IV-3-1. Mesure des courants de charge et de décharge, la résistivité volumique.....	35
IV-3-2. Vieillessement électrique des échantillons .....	36
IV-4. Résultats et discussion .....	37
IV-4-1. Etude sur le polypropylène (PP).....	37
IV-4-1-1. Etude de la conduction électrique.....	37
IV-4-1-1-1. Evolution temporelle du courant charge .....	37

a) Courant de charge (0 à 1000s) .....	37
b) Courant transitoire (absorption) (0 à 60s).....	38
c) Courant de conduction (60 à 1000s) .....	39
IV-4-1-1-2. Evolution temporelle de courant de décharge (dépolariation).....	39
IV-4-1-1-3. Evolution temporelle de la résistivité volumique .....	40
IV-4-1-1-4. Caractéristique courant-tension I(V).....	41
IV-4-1-2. Influence vieillissement électrique sur la conduction électrique .....	41
A. Influence sur les courants de conduction .....	42
B. Influence sur les courants de décharge .....	43
C. Influence sur la résistivité volumique .....	43
IV-4-1-3. Influence du temps de repos sur la conduction électrique.....	45
A. Influence sur les courants de conduction .....	45
B. Influence sur la résistivité volumique.....	48
IV-4-2. Etude sur polystyrène (PS) .....	51
IV-4-2-1. Etude de la conduction électrique.....	51
IV-4-2-1-1. Evolution temporelle du courant de charge.....	51
a) Courant de charge (0 à 1000s).....	51
b) Courant transitoire (absorption) (0 à 60s) .....	51
c) Courant de conduction (60s à 1000s) .....	52
IV-4-2-1-2. Evolution temporelle du courant décharge (dépolariation).....	53
IV-4-2-1-3. Evolution temporelle de la résistivité volumique .....	53
IV-4-2-1-4. Caractéristique courant-tension I(V) .....	54
IV-4-2-2. Influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique .....	55
a) Influence sur les courants de conduction.....	55
b) Influence sur les courants de décharge .....	57
c) Influence sur la résistivité volumique .....	57
IV-4-3. Influence du temps de repos sur la conduction électrique .....	59
IV-4-3-1. Influence sur le courant de conduction.....	59
IV-4-3-2. Influence sur la résistivité volumique .....	62
IV-5. Conclusion .....	64
Conclusion général .....	65
Bibliographie .....	66

*INTRODUCTION  
GÉNÉRALE.*



Les polymères synthétiques sont de plus en plus utilisés dans les industries électriques grâce à leurs performances électriques, leur bonne tenue mécanique, leur grande résistance aux contraintes thermiques et aux attaques chimiques.

Le développement de La HVDC (High Voltage Direct Curent) utilisant les isolants polymères est retardé par le problème de formation de charge d'espace dans le polymère.

Pour cela il faut une meilleure compréhension des mécanismes responsables de cette détérioration. Cette compréhension incite à l'étude des variations des caractéristiques électriques (courant de charge, courant de décharge, résistivités volumique et surfacique) en fonction de la température, du champ, de l'épaisseur et de la nature des électrodes et du temps.

La mesure des résistivités volumiques et surfaciques est relativement difficile à cause de l'influence de plusieurs paramètres sur leurs valeurs tels que l'humidité, la température, l'état de surface, le temps et type de la tension appliquée, impuretés et additifs, etc.... L'une des meilleures méthodes utilisées en pratique est l'utilisation d'un l'électromètre, Ce dernier est utilisé aussi pour la mesure des courants de charge et de décharge.

Notre travail consiste en l'étude de l'influence du temps de vieillissement électrique sur le courant de charge, le courant de décharge, la résistivité volumique de différents polymères.

Notre travail a été scindé en deux parties, une partie théorique et une partie expérimentale.

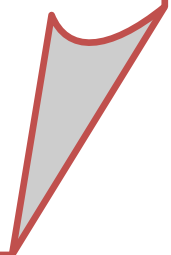
La partie théorique est composée de trois chapitres. Le premier est consacré aux généralités sur les polymères, le second à la conduction électrique dans les diélectriques et le troisième au vieillissement des polymères.

La deuxième partie est réservée à l'étude expérimentale où on s'est intéressé à l'effet du vieillissement électrique sur le Polypropylène (PP) et le Polystyrène (PS) où nous avons présenté les différents montages utilisés ainsi que les résultats suivis d'une discussion.

Enfin, nous terminerons notre travail avec une conclusion générale sous forme de synthèse globale.

# **CHAPITRE I**

## ***GENERALITES SUR LES POLYMERES.***



## I.1- Introduction :

Les polymères sont des matériaux à macromolécule résultant de l'assemblage de molécules élémentaires appelées monomères, à l'aide d'une réaction chimique, dite la *polymérisation*.

Selon leur composition et leurs parties constituantes, les polymères peuvent être subdivisés en plusieurs classes comme les polyxinyles, les polyuréthanes, les polystères, les polyamides, les poly imides.

On utilise ces matériaux synthétiques pour isoler les fils conducteurs servant à construire des bobines de moteurs, transformateurs, relais électro-aimant, pour isoler les câbles de distribution de l'électricité, dans la fabrication des condensateurs et dans beaucoup d'autres domaines tels que la médecine, le bâtiment etc....

La combinaison de ces isolants avec des matériaux tels que la fibre de verre permet d'avoir des feuilles et des plaques isolantes possédant une grande dureté mécanique, une excellente résistance aux hautes températures et des propriétés électriques remarquables. La chimie organique a pour objet l'étude des composés formés de carbone et d'hydrogène, plus éventuellement d'autres éléments tels que l'azote, l'oxygène, le phosphore, le soufre.....

Les substances organiques sont très variées leur nombre dépasse le million [1, 2, 3, 6].

## I.2- Différents types de polymères :

Il existe deux types de polymères :

- Les homopolymères
- Les copolymères

### a) Les homopolymères :

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène.

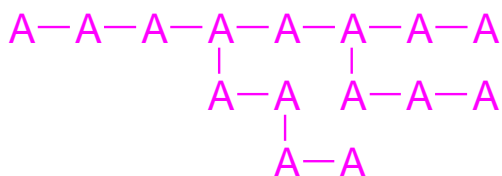
Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles comme le montre les figures suivantes où A désignent l'unité de l'homopolymère.

Parmi les différents types d'homopolymères, nous trouvons :

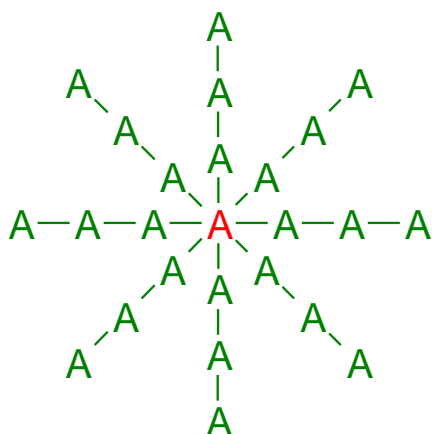
➤ *Les homopolymères linéaires.*



➤ *Les homopolymères branchés.*



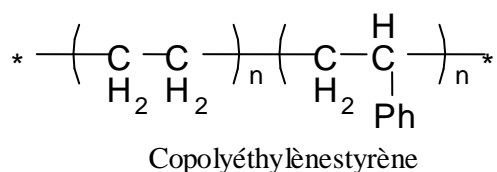
➤ *Les homopolymères étoilés.*



**b) Les copolymères :**

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités.

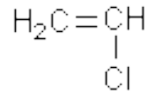
Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères



Les différents modes de copolymères sont illustrés par les figures suivantes où A et B représentent des monomères différents.

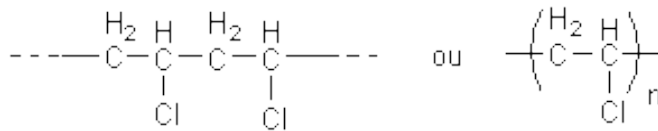
Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :





Monomère

Chlorure de vinyle

**Conduit****à :**

Polymère

Polychlorure devinyle (n indice de polymérisation)

**b) Polymérisation par condensation (polycondensation) :**

C'est la réaction d'addition de deux (2) molécules, avec élimination d'une petite molécule (H<sub>2</sub>O, HCl,...) qui se répète un grand nombre de fois pour donner un composé de masse molaire élevée.

**I.3.3- Procédés de polymérisation :****A. En masse :**

La polymérisation s'effectue en présence d'un catalyseur sous une pression et température élevées, ce qui nécessite un appareillage complexe. Le polymère présente une pureté élevée

**B. En solution :**

Dans ce cas, le monomère et le catalyseur sont dissous dans un solvant, ce qui permet d'opérer des températures plus basses. Par rapport à la polymérisation en masse, une opération supplémentaire est nécessaire, pour la séparation de polymère solvant. Les impuretés du solvant sont susceptibles de polluer le polymère.

**C. En émulsion :**

Les agents émulsionnant sont des catalyseurs solubles dans l'eau (savons, acides gras sulfonés,...), leur utilisation conduit à une émulsion de particules très petites. Les polymères produits ont une masse moléculaire très grande mais l'élimination des agents émulsionnant est difficile.

**D. Polymérisation en suspension :**

On disperse un monomère insoluble dans l'eau en gouttelettes de 10 µm à 5mm par agitation rapide dans une phase aqueuse qui est ensuite additionnée d'un agent stabilisateur.

On introduit dans le monomère, avant sa dispersion, un amorceur comme le peroxyde de benzoyle, qui est soluble en milieu organique. Le monomère en suspension est ensuite polymérisé à une température entre 80 et 110<sup>0</sup> C. A la fin de la réaction, le polymère se trouve sous forme de perles si le polymère et le monomère sont solubles l'un dans l'autre, ou sous forme de granulés s'ils ne le sont pas [4].

## I.4- Présentation des deux matériaux PP et PS:

### I.4.1- le polypropylène (PP) :

#### I.4.1.1- Définition :

Le polypropylène, découvert en 1957, est un thermoplastique obtenu par la polymérisation d'un gaz appelé propylène. Le propylène est une molécule d'éthylène dont un atome d'hydrogène est remplacé par un groupement méthyle (-CH<sub>3</sub>), il est produit par le raffinage du pétrole.

Sa formule chimique est : CH<sub>2</sub>=CH-CH<sub>3</sub>

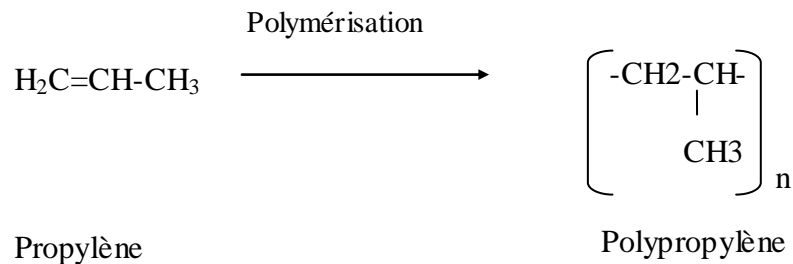


Figure. I.1 : polymérisation de propylène

Suivant le placement des groupes méthyles on trouve :

- Le polypropylène *iso tactique* : le plus utilisé, les groupes méthyles sont tous du même côté de la chaîne [5]. Sa cristallinité est comprise entre 50 % et 75 % [6].
- le polypropylène *atactique* : les groupes méthyles sont placés au hasard de part et d'autre de la chaîne.

- Les copolymères *séquencés* : contiennent des séquences iso tactiques. et des séquences atactiques, ce qui fait de lui un bon élastomère.

#### I.4.1.2- Caractéristiques de polypropylène :

En général le *polypropylène* est léger, très résistant aux chocs et à la torsion répétitive ainsi qu'aux produits chimiques, facilement usinables, pliable, non stérile aux ultraviolets, convient aux usages alimentaires. Dans ce qui suit, on donne les principales caractéristiques en valeurs de ce matériau [5]:

##### A. Caractéristiques physiques :

Densité	0.9
Résistance aux UV.	Mauvaise
Résistance à la radiation	passable
Indice de réfraction	1.49
Absorption d'eau équilibre	0.03 %

##### B. Caractéristiques mécaniques :

Résistance aux chocs-IZOD :	20 à 100 [Jm <sup>-1</sup> ]
Elongation à la rupture	150 à 300 %
Coefficient de frottement	0.1 à 0.3
Résistance à la traction	25 à 40 [MPa]

##### C. Caractéristiques thermiques :

Chaleur spécifique	1700 à 1900 [J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> ]
Conductivité thermique à 23 °C	0.1 à 0.22 [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Température maximale d'exploitation	90 à 120 °C
Température minimale d'exploitation	-10 à 60 °C

##### D. caractéristiques électriques :

Résistivité surfacique	10 <sup>13</sup> [Ohm]
Résistivité volumique	10 <sup>16</sup> à 10 <sup>18</sup> [Ohm.cm]

Rigidité diélectrique	30 à 40 [kV mm <sup>-1</sup> ]
Permittivité relative à 1 MHz	2.2 à 2.6
Facteur de dissipation à 1MHz	0.0003 à 0.0005
La mise en œuvre : Température de moulage :	210 à 300 °C
Température du moule :	20 à 90 °C
Temps d'étuvage :	aucun

#### I.4.1.3- Avantages et inconvénients :

##### A. Avantages :

- Extraordinaire résistance à la flexion ;
- Excellentes propriétés électriques ;
- Bonne propriétés mécaniques ;
- Très bonne résistance aux produits chimiques ;
- Possibilité de fibrillation.

##### B. Inconvénients :

- Fragilité à la basse température ;
- Mauvaise tenue au vieillissement (nécessite l'adjuvant) ;
- Jaunissement à la lumière (stabilisants) ;
- Retrait non homogène ;
- Inserts en cuivre et manganèse déconseillés.

##### C. Domaine d'utilisation :

- Pièces industrielles (automobile : pare chocs, batteries,...) ;
- Tapis, moquettes, cordes, ficelles,... ;
- Equipement ménager ;
- Corps creux, bouchage tubes, tuyaux eau chaude ;
- Bandes de cerclage ;

- Composantes électriques et électronique (PP films imprégnés sont utilisés pour condensateurs de puissance).
- Fabrications de condensateurs.

## I.4.2- Le polystyrène (PS) :

### I.4.2.1- Définition :

Le polystyrène est un composé aromatique, son monomère (le styrène) est une molécule d'éthylène dont un atome d'hydrogène est remplacé par un anneau benzénique, le styrène est produit industriellement à partir du pétrole, sa formule chimique est :

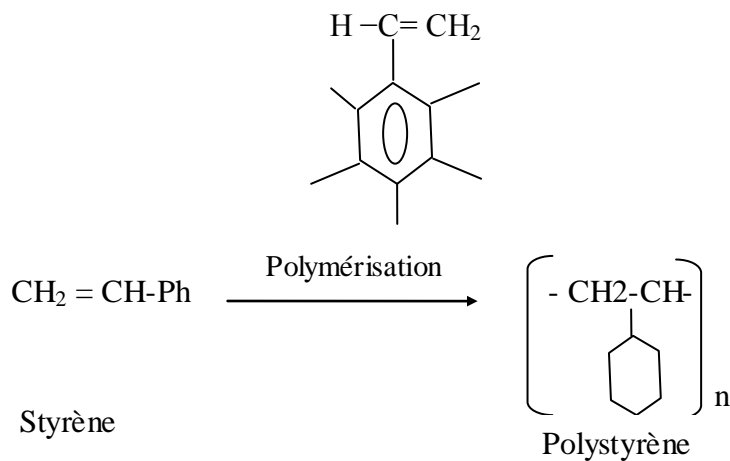


Figure. I.2 : polymérisation du styrène.

Les noms commerciaux de polystyrène sont:

Styrodur, styrofoam, dépron, lacquirene, edistir, empera.

On distingue 3 types de PS:

- **Le polystyrène cristal**: découvert en 1930, non cristallin mais porte ce nom à cause de son aspect transparent.
- **Le polystyrène choc** : avec des propriétés mécaniques améliorées
- **Le polystyrène expansé (PSE)**: découvert en 1951, regroupe le PS moulés (PSE-M) et le PS extrudés (PSE-E) [7].

**I.4.2.2- Caractéristiques du polystyrène :**

En général, le polystyrène a une résistance importante aux chocs, faible prix, thermo formable, léger et bon équilibre entre rigidité, robustesse et résistance à la chaleur, bonne résistance chimique. Dans ce qui suit, on donne ses principales caractéristiques [5] :

**A. Caractéristiques physiques :**

Absorption d'eau sur 24 heures : < 0.4%

Densité : 1.05

Indice de réfraction : 1.59 à 1.5

Indice limite d'oxygène : 19 %

Résistance aux UV : mauvaise

**B. Caractéristiques mécaniques :**

Coefficient de poisson : 0.35

Elongation à la rupture : 1.6 %

Module de tension : 2.3 à 4.1 (Gpa)

Résistance aux chocs-IZOD : 19 à 24 (J/m)

Résistance à la traction : 30 à 100 (Mpa)

**C. Caractéristiques thermiques :**

Chaleur spécifique : 1200 [J/K.Kg]

Coefficient d'expansion : 30 à 210 [ $10^{-6}$  K<sup>-1</sup>]

Conductivité thermique à 23°C : 0.1 à 0.13 [w/m.K]

Température maximale d'exploitation (c) : 50 à 99°C

Le PS est solide à 20 °C et pâteux à 120 °C

Température de fusion entre 150 et 170 °C

Sa dégradation commence dès 350 °C

**D. Caractéristiques électriques :**

Constante diélectrique à 1 kHz :	2.4 à 3.1
Facteur de dissipation à 1 kHz :	0.0002
Rigidité diélectrique :	20 [kV.mm <sup>-1</sup> ]
Résistivité volumique :	> 10 <sup>16</sup> [Ohm.cm]
Mise en œuvre :	

Température de moulage : 160 à 280 °C

Température du moule : 10 à 60 °C

Temps d'étuvage : aucun

**I.4.2.3-Avantages et inconvénients :****a) Avantages :**

- Facilité extrême de mise en œuvre, cadences rapides ;
- Excellente transparence cristal ;
- Bel aspect de surface, possibilités de coloration ;
- Faible retrait ;
- Emballage de produits Alimentaire ( absence d'odeur).

**b) Inconvénients :**

- Résistance aux chocs faibles ;
- Electrostatique ;
- Mauvaise tenue aux hydrocarbures (huile, solvant,...) ;
- Jaunissement à la lumière (stabilisants) ;
- Combustible, mauvaise tenue thermique.

**c) domaines d'utilisation :**

- Equipement ménager, jouets, lumières ;
- Emballage, décoration ;
- Boîtier CD ;

- l'isolation thermique dans le bâtiment et pour la protection contre chocs, PS expansé ;
- Fabrication de condensateurs.

### **I.5- Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents types de polymères et nous avons donné un aperçu sur leurs propriétés physico-chimiques et nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux deux matériaux (PP) et (PS) qui font l'objet de notre étude.

# **CHAPITRE II**

## ***CONDUCTION ÉLECTRIQUE DANS LES DIÉLECTRIQUES.***

## II.1- Introduction

Un isolant parfait, ne présentant strictement aucune conduction dans un champ appliqué constant, s'il ne contiendrait pas d'autres charges que les noyaux atomiques et les électrons des couches internes et des couches de valence complètes, ou qui contiendrait des charges qui resteraient immobiles dans le champ. En réalité ces isolants sont des matériaux dont la résistivité varie de quelque  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$  jusqu'à  $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ . Cette variation suggère fortement que plusieurs phénomènes ou mécanismes de conduction peuvent générer des courants.

Dans ce chapitre nous allons présenter ces différents phénomènes et mécanismes et les différents types de conduction.

## II.2- Généralités :

### II.2.1- Conduction et structure des matériaux :

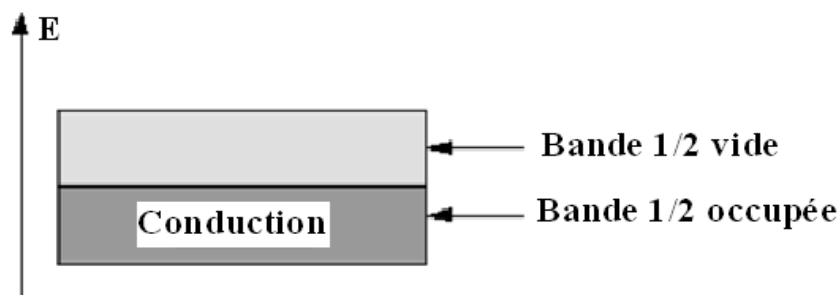
#### II.2.1.1- Rappel sur la théorie des bandes :

##### A. Définition :

La théorie des bandes est l'outil qui permet de décrire les interactions dans la matière entre le champ extérieur, les porteurs, les atomes et les molécules. Cette théorie s'établit parfaitement pour les solides monocristallins [11].

##### B. Les bandes d'énergie pour Les conducteurs et les isolants :

Les deux figures classiques ci dessous schématisent simplement les différences de principe entre conducteurs usuels et isolants usuels. Les ordonnées sont en énergies ( $E$ ).



*Figure II.1 : Conducteur usuel*

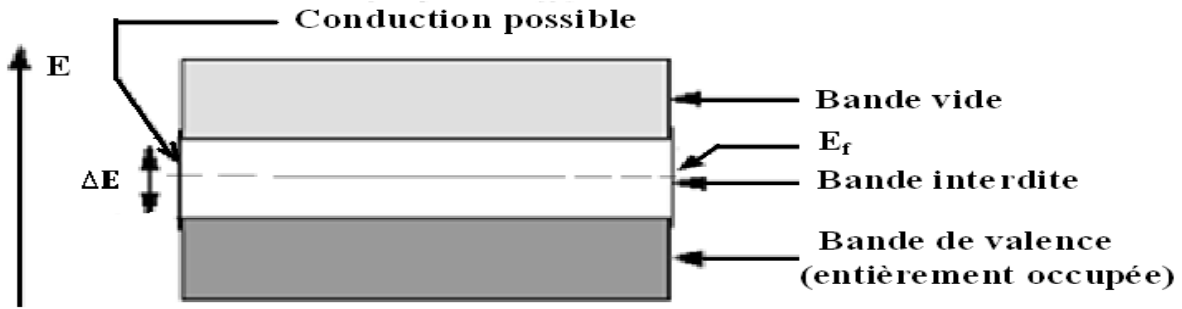


Figure II.2 : Isolant usuel.

Pour les diélectriques (les isolants), des électrons mis en commun dans les bandes occupées peuvent certes se déplacer dans le solide mais pas suffisamment pour assurer une conduction électrique. Il faut une "possibilité de déplacement" dans l'échelle des énergies (contrainte quantique). Une conduction qui correspond au pilotage de porteurs en charge électrique modifie une composante de vitesse (d'où vitesse de dérive), donc l'énergie. Dans le cas d'une bande entièrement occupée (en "restant" dans ses limites relatives), l'accroissement d'énergie est impossible, d'où cette propriété d'être "isolant". Par contre, si la largeur  $\Delta E$  n'est pas trop grande ( $\Delta E \leq 1eV$ ), un saut quantique "à travers" la bande interdite et possible, est l'isolant peut devenir un semi-conducteur.

L'énergie de Fermi  $E_F$  est située dans la bande interdite pour les isolants et les semi-conducteurs et située dans une bande permise pour les conducteurs métalliques.

Le niveau de Fermi est une caractéristique propre à un système qui traduit la répartition des électrons dans ce système en fonction de la température.

**A. Variation de l'énergie de Fermi  $E_F$  avec la température :**

Soit un puits de potentiel contenant  $N_n$  électrons. L'énergie de Fermi correspondant à cet effet est donnée par la relation.

$$E_F = E_{F0} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{K_B T}{E_{F0}} \right)^2 \right] \tag{II-1}$$

$E_{f_0}$  : Énergie de Fermi à T=0 K ;

T : température en °K ;

$K_B$ : Constante de Boltzmann ( $K_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ).

Cette relation montre que la variation de  $E_F$  en fonction de la température  $T$  est faible (entre 0K et 293K, la variation de  $E_F$ , ne vaut que  $5,8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$  comparée à 3eV pour un métal [8]).

### A. Définition du travail de sortie :

On appelle travail de sortie  $W_s$  l'énergie nécessaire pour extraire un électron du métal et l'éloigner infiniment de celui-ci.

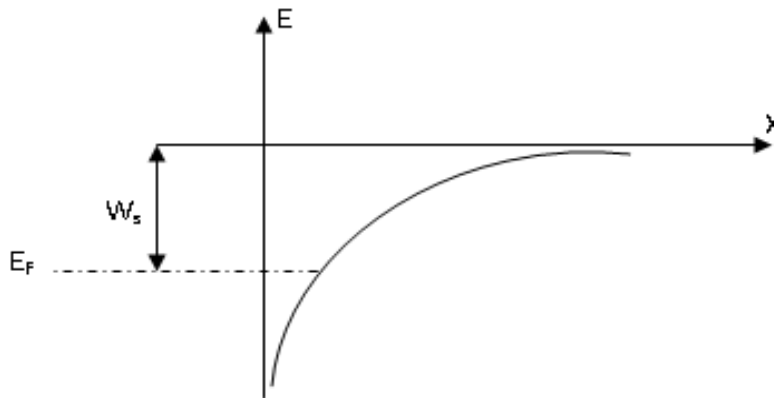


Figure II.3 : Barrière de potentiel et travail de sortie [6, 3].

### B. Mobilité des charges (mobilité des porteurs) :

Les charges situées dans la bande de conduction ou la bande de valence sont considérés comme étant libres de se mouvoir dans le réseau et participent à la conduction.

La mobilité de ces charges est donnée par la relation suivante :

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad (\text{II-2})$$

Où :

$q$ : Est la charge de l'électron ( $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) ;

$\tau$  : Temps moyen entre deux collisions avec le réseau ;

$m^*$  : La masse effective de la particule.

**II.2.1.2- Courants de conduction, de diffusion, de déplacement et courant de polarisation :**

Les porteurs entrent par l'une des électrodes, sortent par l'autre. Il existe cependant deux autres sources de courants qu'on peut mesurer, ce sont les courants de déplacement et les courants de polarisation.

La densité de courant, mesurée dans un circuit extérieur, due à l'application d'une différence de potentiel entre les deux faces d'un diélectrique est donnée par la relation suivante :

$$j(t) = qn(x,t)\mu(E,t)E(x,t) - qD_n \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial D(x,t)}{\partial t} \quad (\text{II-3})$$

Où :

$q$  : Est la charge élémentaire ( $q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ ) ;

$n(x,t)$  : Densité des porteurs à l'abscisse  $x$  à l'instant  $t$  ;

$\mu(E,t)$  : Mobilité des porteurs ;

$E(x,t)$  : Champ local à l'abscisse  $x$  à l'instant  $t$ , résultant de l'application de la

Différence de potentiel aux bornes du diélectrique ;

$D_n$  : Constante de diffusion des porteurs' liée à la mobilité par la relation d'Einstein

$D(x,t)$  : Vecteur d'induction électrique, donnée par la formule suivante :

$$D(x,t) = \varepsilon_0 E(x,t) + P(x,t) \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$P$  : Polarisation du diélectrique ;

$\varepsilon_0$  : Permittivité du vide ;

D'où :

$$j(t) = j(x,t) + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (\text{II-5})$$

**Et :**

$$j(x,t) = qn(x,t)\mu(E,t)E(x,t) - qD_n \frac{\partial n(x,t)}{\partial t}$$

Où :

$j(x,t)$  : Densité de courant local à l'abscisse  $x$  à l'instant  $t$ .

Ce courant est composé :

- D'un courant dû au mouvement de charges sous l'action d'un champ (courant de conduction).
- D'un courant dû au mouvement de charges sous l'action de leur gradient de concentration (courant de diffusion).

$\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$  Et  $\frac{\partial P}{\partial t}$  sont respectivement les courants de déplacement et de polarisation.

Les deux courants sont des courants transitoires qui décroissent jusqu'à s'annuler avec le temps.

Le courant de déplacement est lié à la variation de champ électrique. C'est par exemple, le courant transitoire recueilli aux bornes d'un condensateur à air soumis à un échelon de tension.

**II.2.1.3- Définition du courant d'absorption et de résorption dans un isolant :**

Soit un échantillon d'un isolant placé entre deux électrodes, comme le montre la figure suivante. L'épaisseur de l'échantillon et la surface des électrodes sont successivement  $d$  et  $S$ .

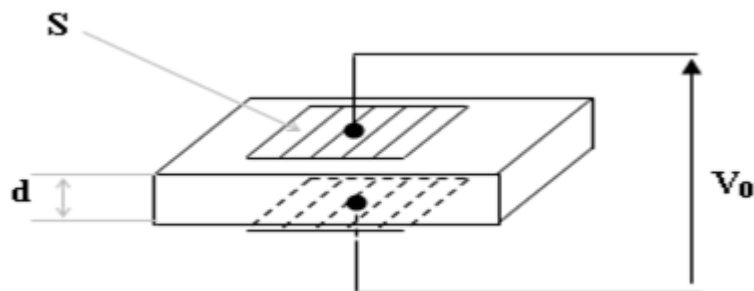


Fig. II.4

S'il on suppose que cet isolant est dépourvu de toute conductivité, un courant de charge  $i_1$  circule dans le circuit et varie avec le temps.

Ce courant peut être calculé par la relation suivante [2] :

$$L \frac{d^2 i_1}{dt^2} + R \frac{di_1}{dt} + \frac{i_1}{C} = 0 \quad (\text{II-6})$$

Avec : L et R sont la self-induction et résistance du circuit ;

Et  $C = \epsilon_0 \frac{\epsilon_r S}{d}$  la capacité du condensateur constitué par le système électrode-isolant.

Mais il n'existe pas d'isolant qui est entièrement dépourvu de conductibilité. D'où; en régime stable, le diélectrique est traversé par un courant de conduction  $i_c$ .

En court-circuitant les armatures du condensateur, le courant de décharge  $i_2$  doit suivre les mêmes lois que  $i_1$ .

$$i_2 = -i_1 \quad (\text{II-7})$$

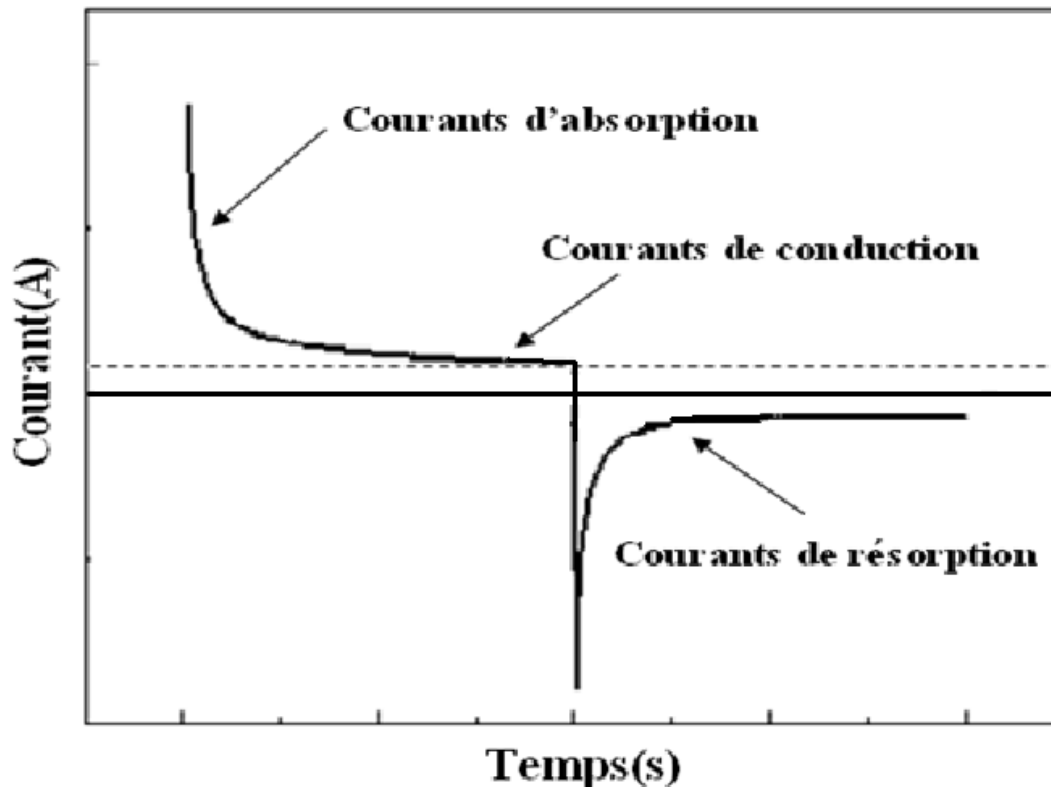
En pratique, tous les isolants solides, soumis à des champs électriques faibles ne permettant pas l'injection de charges au niveau des électrodes, sont parcourus par des courants résiduels qui persistent pendant des jours et même des mois, désignés par  $i'_1$  et  $i'_2$  et appelés respectivement courant d'absorption et courant de résorption [2].

Et les courants de charge et de décharge seront égaux à :

$$I_1 = i_1 + i_c + i'_1 \quad (\text{II-8})$$

$$I_2 = i_2 + i'_2 \quad (\text{II-9})$$

La figure suivante représente les variations des courants d'absorption, de conduction et de résorption en fonction du temps.



*Figure II.5 : Variation des courants d'absorption, de conduction et de résorption en fonction du temps [10].*

### II.3- Mécanismes de conduction dans les isolants :

#### II.3.1- Mécanismes de conduction limitée par l'interface métal isolant [10]:

La figure (II-6-a) représente le schéma des bandes à l'interface électrode métallique diélectrique. Comme nous l'avons cité dans le paragraphe II-2-1-1-c,  $E_F$  qui est niveau de Fermi du métal d'électrode, ne dépend que de la nature de ce métal.  $E_v$  et  $E_c$  sont respectivement les énergies correspondant au niveau supérieur de la bande de valence et au niveau inférieur de la bande de conduction.

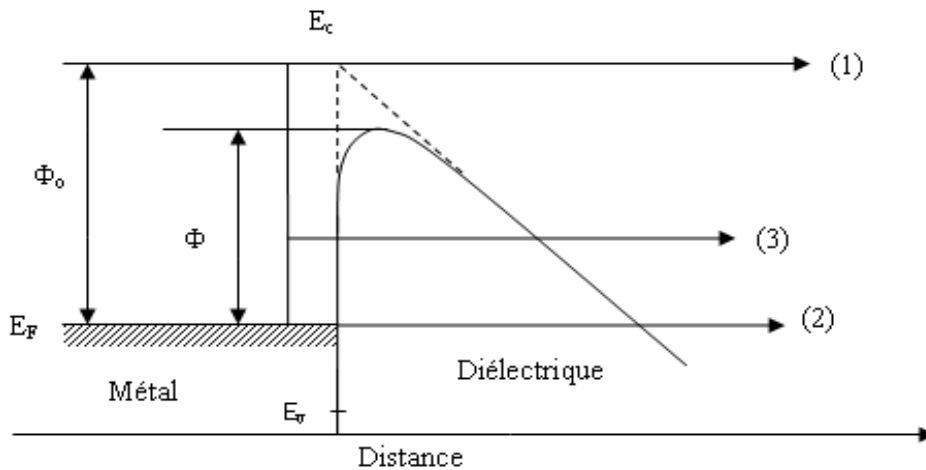
Un électron situé au niveau de Fermi  $E_F$  à la cathode a trois possibilités pour pénétrer dans le diélectrique où il doit arriver dans la bande de conduction pour pouvoir participer au transport.

Ces trois possibilités sont :

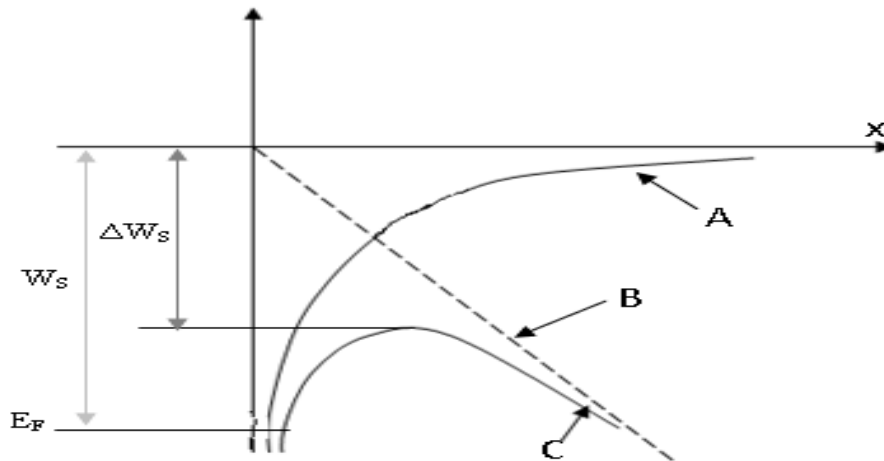
- 1) Passage par-dessus la barrière ou effet thermoélectronique (ou effet Schottky) ;
- 2) Passage au travers de la barrière à énergie constante;
- 3) Passage au travers la barrière après un gain d'énergie.

**II.3.1.1- Effet thermoélectronique (ou effet Schottky) :**

L'effet Schottky résulte de l'émission thermoélectronique d'un porteur à partir de l'électrode lorsque le champ abaisse la barrière de potentiel. Comme est illustrée dans les figures suivantes :



*Figure II.6-a) : Diagramme de bandes à l'interface électrode métallique diélectrique [10].*



**Figure II.6-b) :**

- A) barrière en l'absence de champ électrique ;
- B) énergie potentielle résultant du champ ;
- C) barrière en présence de champ [1].

Dès qu'un électron quitte la plaque il subit l'action du champ électrique qui se manifeste par une force tendant à l'éloigner de celle-ci [2].

$$F = \frac{Q_e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} \quad (\text{II-10})$$

Où  $Q_e$  : Est la charge sur un électron ;

$\epsilon_0$  : Permittivité du vide.

Le travail de sortie  $W_s$  est déduit de [6] :

$$\Delta W_s = e \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (\text{II-11})$$

Tels que :  $Q_e = q = e$

La hauteur de la barrière  $\Phi$  que doit franchir un porteur issu de l'électrode métallique est déterminé par la relation suivante :

$$\Phi = \Phi_0 - \beta_s E^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II-12})$$

Avec :  $\beta_s = \left( \frac{q^3}{4\epsilon_r \epsilon_0} \right)^2$  c'est la constante de Schottky ;

$\epsilon_r$  : Permittivité relative du diélectrique ;

$\Phi_0 = E_C - E_F$  : La hauteur de la barrière en l'absence du champ électrique E.

Et la densité de courant est alors [3] :

$$J = \frac{4\pi mk^2}{h^3} T^2 \exp\left(\frac{-\Phi}{kT}\right) \quad (\text{II-13})$$

Où : m : est la masse de l'électron ;

h : constante de Plank. Dans cette formule la quantité  $A = \frac{4\pi mk^2}{h^3}$  est appelée constante de Richardson-Schottky ( $A = 120 \text{ A/cm}^2$ ).

A température ambiante, si le champ augmente, les électrons peuvent franchir la barrière de potentiel par effet tunnel. L'émission de champ se calcule à partir de la formule de Fowler-Nordheim.

### II.3.1.2- Emission de champ (effet Fowler-Nordheim) :

Ce mécanisme évoque l'existence du phénomène de transport régis par l'interface métal-isolant et l'injection par effet tunnel d'un électron à partir d'une électrode sous l'influence d'un champ électrique.

La relation de Fowler-Nordheim est valable pour des champs élevés de  $10^8$  à  $10^{10}$  V/m et des températures de 300°K [7, 10].

$$J = A' E^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \quad (\text{II-14})$$

$$\text{Avec : } A' = \frac{q^3}{8\pi h \Phi_0} ;$$

$$B = 4(2m)^{1/2} \Phi_0^{3/2} .$$

L'effet tunnel est le seul mécanisme sur lequel la température a un effet négligeable. Il constitue l'émission de champ, qui peut conduire à des densités de courant relativement élevées [2, 8]. Dès que la barrière de potentiel devient suffisamment mince (par effet d'un champ élevé), les électrons disposent d'un nouveau chemin pour quitter le métal.

En effet, tous les électrons sont susceptibles de quitter le métal par effet tunnel, alors que dans l'émission thermoélectronique seule les électrons occupant des états situés au voisinage et au-delà de l'énergie de Fermi ont cette possibilité.

### II.3.2- Mécanismes de conduction contrôlée par le volume du diélectrique :

#### II.3.2.1- Courant limité par la charge d'espace :

Les charges injectées sont freinées en pénétrant dans le matériau. Dans les mécanismes limités par charges d'espace on considère qu'un porteur se déplace sous l'effet du champ électrique selon la loi suivante [1, 2, 3, 6] :

$$v = \mu E \quad (\text{II-15})$$

Avec ;  $v$  : La vitesse du porteur ;

$\mu$  : Mobilité du porteur ;

$E$  : Le champ électrique auquel est soumis l'isolant

La charge d'espace est l'ensemble des charges réelles positives ou négatives, contenues dans un isolant.

On distingue deux types de charges d'espace. Les charges intrinsèques qui sont les ions contenus initialement dans l'isolant et les charges extrinsèques qui sont les charges injectées à partir des électrodes dans le diélectrique.

A une distance  $s$  de l'interface air/isolant, au niveau de la charge d'espace on peut écrire [2] :

$$\frac{ds}{dt} = \mu E(s) \tag{II-16}$$

La charge  $Q$  dans le diélectrique au temps  $t$  est donnée par la relation suivante :

$$J_0 A = \rho \mu E_x A = \frac{-Q}{t}$$

D'où  $Q = -J_0 A t$  (II-17)

Avec :  $\rho$  : Densité de charges libres ;

$A$  : Aire de l'électrode.

Le schéma de la figure **II.8** représente le courant limité par charge d'espace dû à des électrons pénétrant dans un isolant solide.

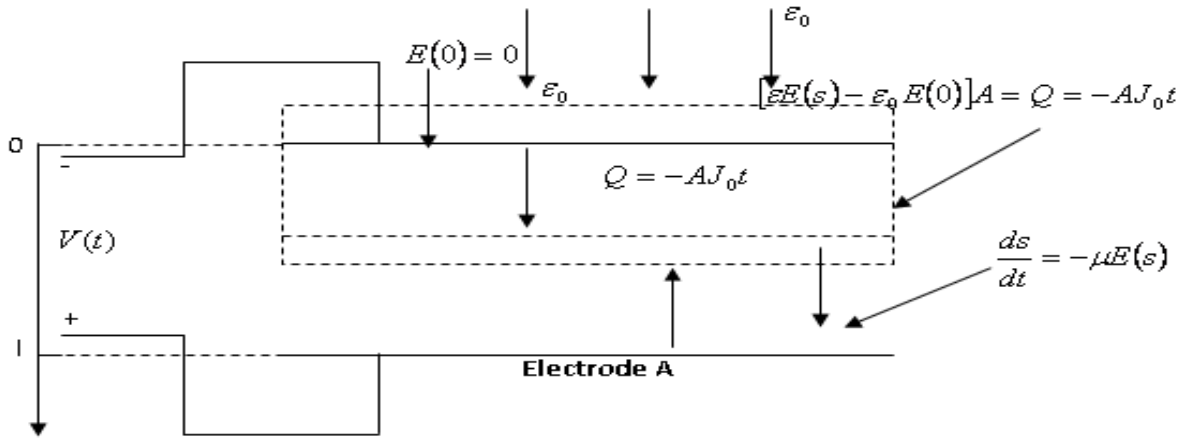


Figure. II.8 : Courant limité par charge d'espace [2].

En appliquant le théorème de Gauss à un parallélépipède contenant toute la charge présente dans le diélectrique, on aura :

$$\oint_s \epsilon E ds = [\epsilon E(s) - \epsilon_0 E(0)]A = Q = -J_0 A t \quad (\text{II-18})$$

D'où :

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\mu J_0 t^2}{\epsilon} s(t) = \frac{\mu J_0 t^2}{2\epsilon}$$

Derrière le front du faisceau d'électrons, on doit avoir :

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{J_0}{\epsilon \mu E_x}$$

Ainsi :

$$E_x \frac{dE_x}{dx} = \frac{J_0}{\epsilon \mu} \quad (\text{II-19})$$

Les solutions de cette équation sont :

$$E_x = \begin{cases} -\sqrt{\frac{2J_0 x}{\epsilon \mu}} & \text{Si } 0 \leq x \leq s(t) \\ -\sqrt{\frac{2J_0 s}{\epsilon \mu}} & \text{Si } s(t) \leq x \leq l \end{cases}$$

De l'expression II.20 selon laquelle le champ dérive du potentiel on peut déterminer l'expression de  $V(t)$ .

$$V(t) = \int E(x, t) dx \quad (\text{II-20})$$

$$\text{D'où : } V(t) = \int_0^l E_x dx = \int_0^{s(t)} \sqrt{\frac{2J_0 x}{\eta\mu}} dx + \int_{s(t)}^l \sqrt{\frac{2J_0 s}{\varepsilon\mu}} dx$$

$$\text{Donc : } V(t) = \frac{J_0 l t}{\varepsilon} - \frac{\mu J_0^2 t^3}{6\varepsilon^2} \quad (\text{II-21})$$

$$\text{Avec : } s(t) \leq l$$

Le système devient stable quand le faisceau atteint l'électrode A, pour  $s = l$ .

$$s(t) = l = \frac{\mu J_0 t^2}{2\varepsilon}$$

Et au temps:  $t = \sqrt{\frac{2\varepsilon l}{\mu J_0}}$  dit le temps de transit entre les deux électrodes.

La tension  $V_0$  est fonction de  $J_0$  selon la relation suivante

$$V_0^2 = \frac{9 \varepsilon \mu}{8 l^3} \frac{1}{J_0} \quad (\text{II-22})$$

$$\text{D'où on aura : } J_0 = \frac{9 \varepsilon \mu}{8 l^3} \frac{1}{V_0^2}$$

En remplaçant l'expression de  $J_0$  dans l'expression de  $t$  on va avoir :

$$t = \frac{4}{3} \frac{l^2}{\mu V_0} \quad (\text{II-23})$$

Ce calcul théorique à été fait par Many et Raskavy (1962). Si l'isolant est court-circuité, un courant est détecté. Ce courant est dû aux charges extérieures et qui sont relâchées par des pièges.

II.3.2.2- Effet Poole-Frenkel :

Si le matériau comporte un certain nombre de pièges résultants soit d'une discontinuité entre régions ordonnées et régions désordonnées ou de présence d'impuretés, des porteurs peuvent être capturés par ces pièges. L'application d'un champ électrique se traduit par l'abaissement de la barrière de potentiel et les porteurs passent soit dans la bande de conduction, soit dans un autre site [2,13, 14].

Donc l'effet Poole-Frenkel résulte de l'abaissement de  $\Delta W$ , de l'énergie d'ionisation  $W$  du centre ionisé, sous l'effet du potentiel coulombien et du potentiel associé au champ appliqué  $E$  [1]. La figure suivante montre bien que le champ appliqué abaisse l'énergie d'ionisation

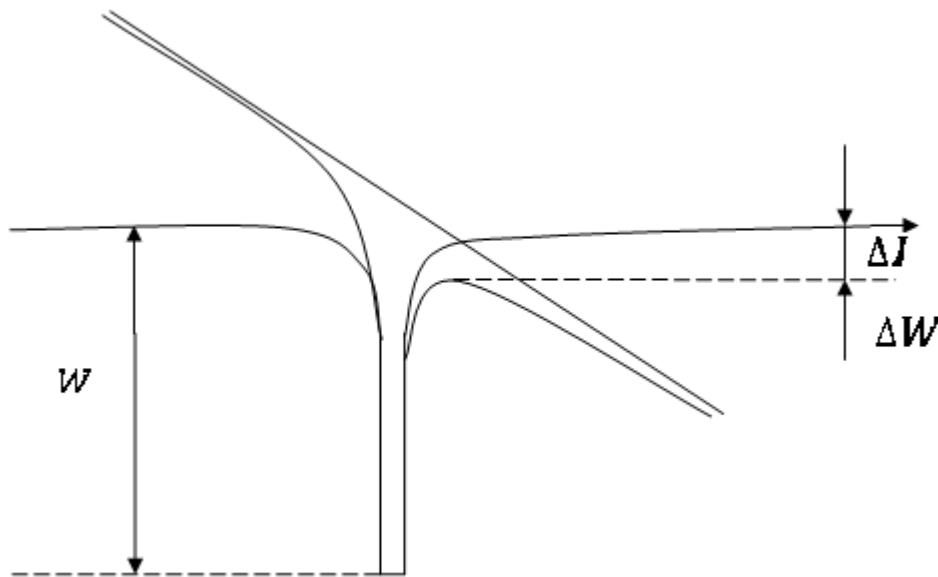


Figure II.9: L'effet Poole-Frenkel. Le champ appliqué abaisse l'énergie d'ionisation [11].

L'abaissement  $\Delta W$ , exprimé en  $eV$ , s'écrit :

$$\Delta W = \left( \frac{eE}{\pi\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{II-24}$$

D'où la hauteur de la barrière de potentiel est abaissée d'un facteur  $\Delta\Phi$  donné par la formule suivante :

$$\Delta\Phi = B_{PF} E^{\frac{1}{2}} \tag{II-25}$$

Avec :  $B_{PF} = \left( \frac{e}{\pi\epsilon_r\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$  appelé coefficient de Poole-Frenkel.

Sachant que la probabilité de saut par-dessus de la hauteur  $\Phi$  de la barrière abaissée est :

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\Phi}{KT}\right) \tag{II-26}$$

Où :  $P_0$  Est la probabilité de saut au dessus de la hauteur  $\Phi_0$  de la barrière de potentiel en l'absence de champ appliqué ;

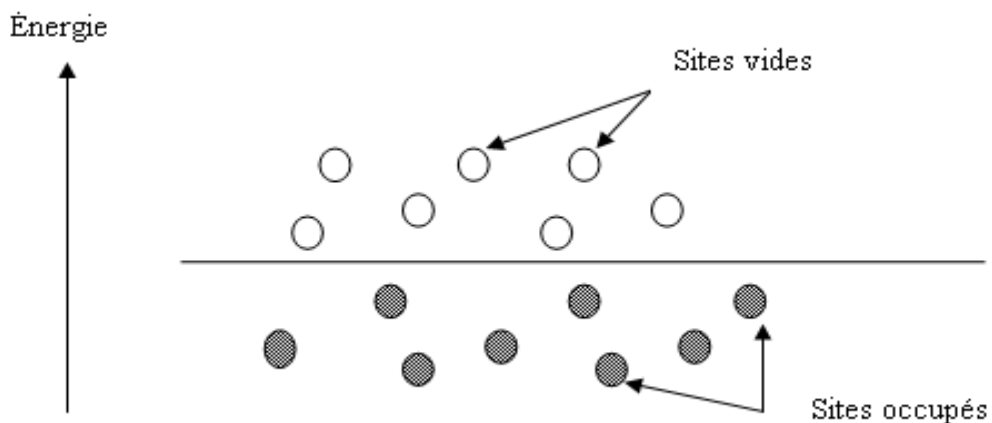
$KT$  : Énergie thermique permettant ce saut.

La densité de courant s'écrit :

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{\left(\Phi_0 - B_{PF} E^{\frac{1}{2}}\right)}{KT}\right) \tag{II-27}$$

**II.3.2.3- Conduction par saut (hopping) :**

La situation des sites au tour du niveau de fermi  $E_F$  à l'intérieur du matériau peut être représentée par la figure suivante [11] :



**Figure II. 10 : Sauts de site à site dans un mécanisme de Hopping [11].**

La conductivité par sauts entre les deux sites est donnée par la relation suivante [1, 11] :

$$\sigma = \sigma_o \exp \left[ - \left( \frac{2R}{R_o} + \frac{\Delta E}{KT} \right) \right] \quad (\text{II-28})$$

Où : R : Est la distance entre les sites ;

$R_o$  : Distance caractéristique d'amortissement radial ;

$\Delta E$  : L'écart énergétique entre les deux sites ;

Or R et  $\Delta E$  sont liée par la densité d'états  $N_i (m^{-3}ev^{-1})$  des sites, supposée uniforme au voisinage du niveau de fermi par la relation suivante [12, 13,14] :

$$R = \left[ \frac{3}{4 \Pi N_i \Delta E} \right]^{1/3} \quad (\text{II -29})$$

La relation de la conductivité de sauts entre les sites a été réduite par Matt en suggérant qu' tel système prend une conductivité maximale pour une énergie  $\Delta E_{\max}$ .

Cette conductivité s'écrit donc :

$$\sigma = \sigma_o \exp \left[ - \left( \frac{T_1}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (\text{II-30})$$

D'Où 
$$\sigma = \sigma_o \exp \left[ - \left( AT^{-1/4} \right) \right]$$

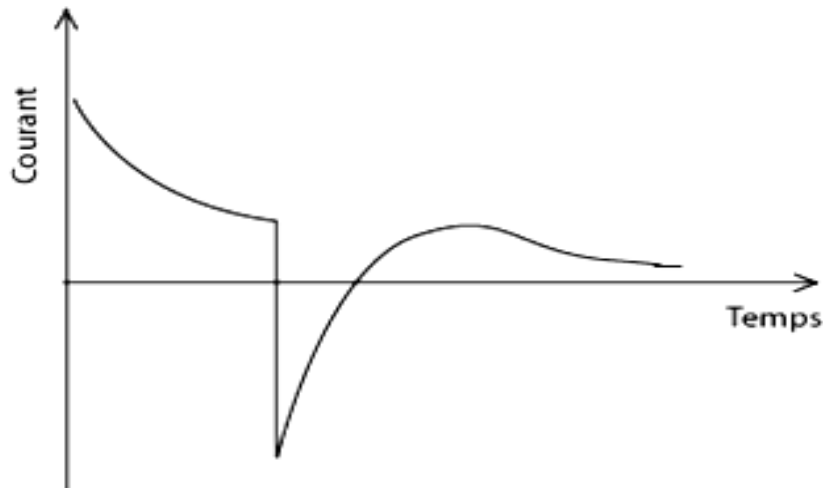
Où :

A : est une constante dépendant de la densité et de la nature des pièges.

#### II.3.2.4- Cas des courants non réversibles :

Comme le souligne SEGUI [10], il est courant dans la pratique de trouver des comportements anormaux, où le courant de résorption change de polarité au cours du temps

(Voir figure II-11). Ces comportements sont le plus souvent la conséquence d'une charge d'espace présente dans le matériau avant la polarisation ou de la création lors de cette même polarisation d'une distribution non uniforme de charges. Lors de la mise en court circuit d'un échantillon polarisé et chargé non uniformément, les charges vont se redistribuer de façon à ce que la différence de potentiel à ses bornes soit nulle. Il en résulte un courant de dépolarisation inhabituel.



*Figure II.11 : Représentation des courants non réversibles*

#### **II.4- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons étudié le concept de conduction dans les diélectriques et les différents mécanismes de cette conduction.

# **CHAPITRE III**

## ***VIEILLISSEMENTS DES POLYMÈRES.***

### III.1- Introduction :

Les matériaux isolants sont soumis au cours de leur vie à de nombreuses contraintes (champ électrique, température, humidité, radiations,... etc.), pouvant influencer leur comportement à long terme.

Il est généralement admis que de nombreux processus destructifs dans les systèmes d'isolation sont le résultat des effets combinés de plusieurs de ces contraintes.

### III.2- Vieillessement des polymères :

On appelle vieillissement tout phénomène (à l'exclusion des phénomènes purement mécanique tel que le fluage ou la fatigue) se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau.

Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis, on est même souvent en présence de phénomène complexe faisant intervenir simultanément plusieurs mécanismes tels que l'oxydation à température modérée, hydrolyse, migration d'adjuvants. On distingue essentiellement deux types de phénomènes : *le vieillissement physique* et *le vieillissement chimique*.

#### III.2.1- Vieillessement physique :

La composition chimique du matériau n'est pas modifiée, le vieillissement physique peut se produire avec ou sans transfert de masse

##### III.2.1.1-Vieillessement physique avec transfert de masse :

Un solvant peut pénétrer dans le matériau où il peut y avoir plastification accompagnée d'un gonflement ou également, pertes d'adjuvant par extraction ou évaporation. Lorsque le matériau est soumis à des contraintes (mécanique, électrique, etc.).

Le solvant peut provoquer une craquelure : la déformation du polymère se poursuit. Il se développe un phénomène de fissuration.

Avec l'eau il peut exister des gradients de concentration dû à la diffusion, à un gonflement différentiel fibre-polymère pour les matériaux composites ou à un gonflement dû aux hétérogénéités du matériau. Cette pénétration de l'eau dans le matériau contribue à la diminution de la résistance d'isolement.

**III.2.1.2- Vieillessement physique sans transfert de masse :**

Un matériau peut se fissurer sous contraintes en présence d'un composé tensio-actif. Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement physique interne.

- **Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif :**

En milieu tensio-actif, sous l'action de contraintes mécaniques, des fissurations peuvent se produire dans certains cas comme dans le polyéthylène. Le phénomène de fissuration est lié au développement de forces de tension superficielle à l'interface polymère-liquide, et également à la masse moléculaire du polymère. En effet, Une masse moléculaire élevée rend le polymère moins sensible à ce type de fissuration [15].

- **Vieillessement par relaxation de volume et d'enthalpie :**

Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la capacité du réseau macromoléculaire, autrement dit par une réduction du volume spécifique. Dans les polymères semi-cristallins, certains segments stéréo réguliers (donc capable de cristalliser), qui se trouvaient piégés dans la phase amorphe, vont progressivement diffuser et s'incorporer à des zones-cristallines. Le vieillissement physique se traduit alors par une augmentation du taux de cristallinité (PE, PP).

- **Vieillessement par les chocs thermiques :**

Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle, entraînant des contraintes internes susceptibles d'endommager le matériau, il s'agit d'un phénomène de fatigue mécanique.

**1) Gradient de température dans l'épaisseur :**

Les matériaux organiques sont, sauf cas particulier, des isolants thermiques. Lorsque la température du milieu varie rapidement, un gradient de température s'instaure dans l'épaisseur du matériau d'où dilatation différentielle zone superficielle-zone interne.

Dans le cas d'un choc thermique de grande amplitude, une seule excursion en température peut entraîner la rupture. Dans le cas de cycles de plus faibles amplitudes, l'endommagement peut intervenir à terme, le matériau étant sollicité en fatigue. [15]

## 2) Matériaux hétérogènes :

Dans les matériaux composites, soumis à des variations de température, les dilatations différentielles entraînent des contraintes internes susceptibles d'endommager le matériau, il s'agit d'un phénomène de fatigue mécanique.

### III.2.1.3- Influence du vieillissement physique sur les propriétés du polymère :

Le vieillissement physique affecte toutes les propriétés dépendant du volume libre et de la mobilité moléculaire. La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue, le facteur de pertes diélectriques diminue, la diffusion des gaz et des liquides diminue. Dans certains cas comme pour le PE les propriétés optiques peuvent également être modifiées.

## III.2.2- Vieillessements chimiques :

Ils provoquent une modification du matériau sous l'influence de l'environnement. Dans la pratique, il se superpose à un vieillissement physique. Les isolations peuvent être soumises à différents types de vieillissement chimique.

### III.2.2.1- Oxydation :

L'oxydation se produit à des températures modérées (généralement inférieur à 300°C). La présence de l'oxygène dans le matériau a pour effet.

- ❖ l'abaissement du seuil de température au-delà duquel un vieillissement thermochimique anaérobie démarre ;
- ❖ la provocation d'une plus forte exothermique ;
- ❖ l'entraînement d'une prédominance de coupures de chaînes de polymères par r
- ❖ apport aux réticulations.

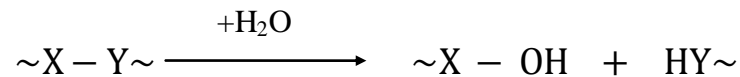
L'utilisation d'anti oxygènes ou de noir de carbone peut empêcher ou ralentir le phénomène d'oxydation.

### III.2.2.2- Hydrolyse :

Sous l'influence de l'humidité ( $\geq 95\%$ ) et de la température (*au moins* 100°C), certains polymères (polyesters, polyuréthanes, etc.) peuvent se dégrader. Ce vieillissement

Climatique peut dégrader les caractéristiques électriques à la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminements.

La réaction d'hydrolyse s'effectue en présence de l'eau (H<sub>2</sub>O). Elle peut être schématisée comme suit [16].



Le groupement — X — Y — peut être latéral [par exemple ester dans les polymères acryliques et méthacryliques]. Les phénomènes d'hydrolyse ont un certain nombre de caractéristiques communes suivantes.

- Très lente à la température ambiante ;
- Les effets d'hydrolyse se superposent aux effets physiques de l'absorption d'eau ;
- Ce sont des réactions activées par l'élévation de la température ;
- Elle est susceptible d'être catalysée par des agents chimiques divers : ions H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, métaux de transition, etc.

#### III.2.2.3- Coupure de chaînes statiques :

Les longues chaînes des polymères peuvent être cassées (coupées) suite à l'augmentation de la température ce qui provoque une diminution de la longueur des chaînes, diminution de la masse moléculaire moyenne (polymères linéaires), diminution du taux de réticulation et donne une augmentation de la masse moléculaire dans le cas des polymères tridimensionnels.

Les propriétés affectées par ces coupures sont celles liées à des interactions polymère-solvant. La solubilité, la diffusion et la perméabilité augmentent avec le taux de dégradation [4].

#### III.2.2.4- Dépolymérisation :

C'est la réaction inverse de la polymérisation, un cas particulier de la réaction de coupure de chaînes. Elle crée un site actif qui déstabilise la liaison monomère-monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules de monomère [4].

#### III.2.2.5- Réticulation :

C'est la réaction formant de ponts covalents entre les segments voisins des chaînes. Elle provoque une diminution de la mobilité moléculaire des segments de chaînes.

**III.2.2.6- Vieillessement électrique :**

Si le matériau est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation de radicaux libres, ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il en suit une dégradation généralisée ou localisée (arborescences électriques) des isolants en présence d'humidité, d'impuretés ioniques sous l'influence de la température. Des réactions électrochimiques peuvent également conduire à une dégradation des propriétés du matériau. Dans certaines circonstances il peut apparaître des arborescences électrochimiques.

**III.2.2.7- vieillissement climatique :**

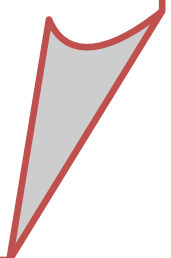
Le vieillissement climatique résulte de l'exposition directe des matériaux au rayonnement solaire, aux intempéries et à diverses pollutions (marine, industrielle...etc.) : la température joue également un rôle important, tels que l'oxyde de zinc et l'oxyde de titane, absorbeur UV). Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques et la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminements.

**III. 3- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous nous sommes étalés sur les différents types de vieillissements des polymères ainsi que leurs conséquences sur ces derniers.

# **CHAPITRE IV**

***PARTIE EXPÉRIMENTALE.***



## IV.1- Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les montages expérimentaux utilisés dans notre travail suivis des résultats obtenus et leurs discussions.

## IV.2- Préparation des échantillons :

Les échantillons utilisés lors de nos essais ont une forme circulaire de 80 mm de diamètre chacun. Les épaisseurs des échantillons du PP et du PS sont de 3mm.

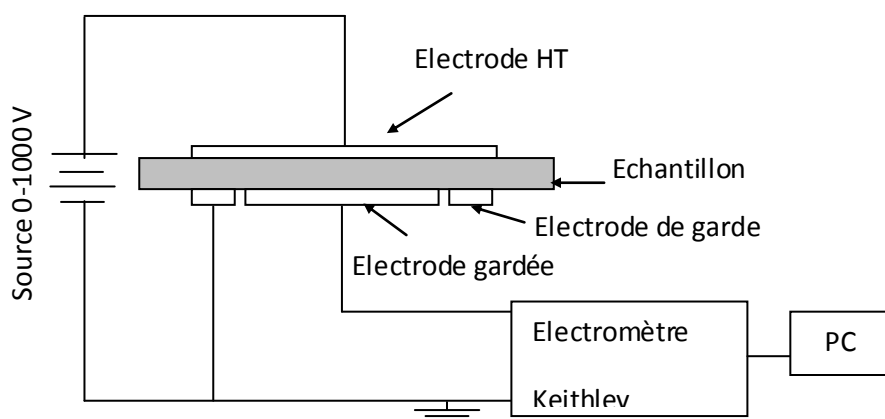
Chaque échantillon est nettoyé avec de l'eau puis court-circuité à l'aide de l'électromètre durant 1000 s avant chaque première charge afin de minimiser les charges résiduelles.

## IV.3- Montages expérimentaux :

### IV.3.1- Mesure des courants de charge et de décharge, la résistivité volumique et surfacique:

La figure (IV.1) représente le montage des appareillages utilisés pour mesurer les courants de charge et de décharge et les résistivités volumique et surfacique. Ce montage comprend :

- un électromètre Keithley 6517;
- une enceinte Keithley 8009;
- un micro-ordinateur pour la commande et l'acquisition des données.



*Figure IV.1 : Montage de mesure des courants de charge et de décharge, des résistivités volumique et surfacique.*

Durant ces mesures, le courant de charge est obtenu par l'application d'une tension continue de 1000V durant 1000 s ; le courant de décharge consiste en un court-circuit pendant

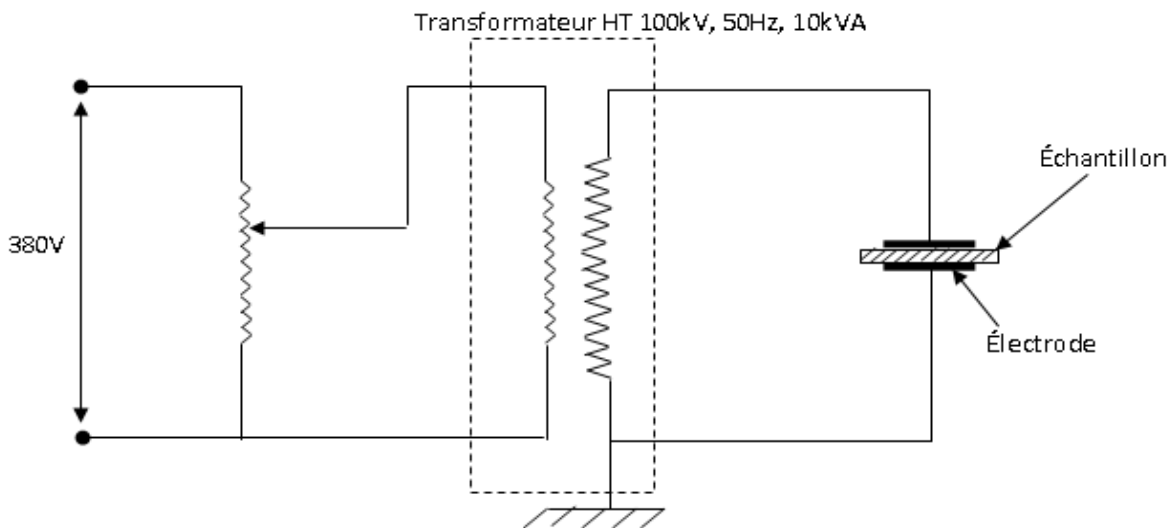
1000 s. Pour la mesure de la résistivité volumique, on applique un signal carré d'amplitude 1000V et 60 s par demi-période.

**IV.3.2- Vieillessement électrique des échantillons :**

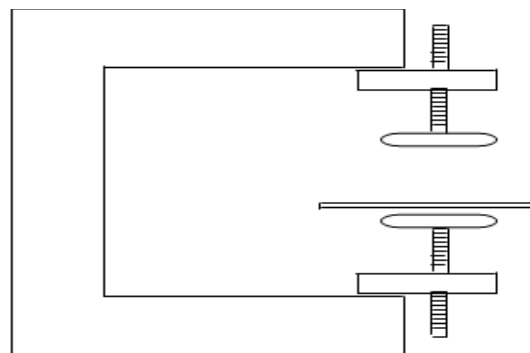
Le schéma du dispositif expérimental utilisé pour cette étude est représenté par la figure (IV-2). Les électrodes utilisées sont de configuration plan-plan. L'électrode supérieure est reliée à la haute tension et l'électrode inférieure est reliée à la terre.

Le vieillessement électrique est obtenu par l'application d'une tension alternative de 10kV, obtenue à l'aide de l'autotransformateur qui se trouve au niveau du pupitre de commande, pendant des durées différentes (1 heure, 2h, 4h, 6h et 8h).

Les électrodes sont portées par un support en bakélite figure (IV-3) conçu de manière à ce qu'elles soient parfaitement opposées et perpendiculaires par rapport au plan et à faciliter le réglage de la distance inter- électrodes.



*Figure IV.2 : Montage expérimental permettant d'avoir le vieillessement.*



*Figure IV.3 : Support des électrodes.*

Rogowski de la figure (IV.4):

Les électrodes planes utilisées sont en cuivre, de 5 cm de diamètre ayant le profil de

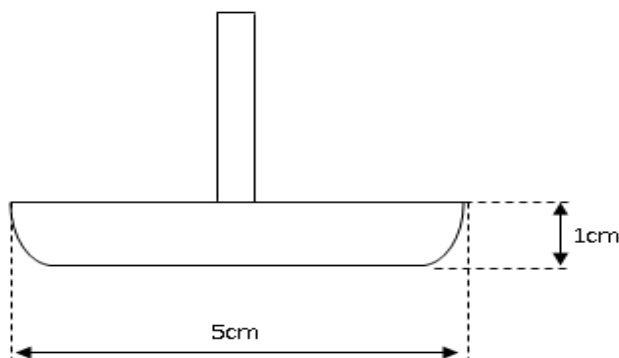


Figure IV.4 : Dimensions de l'électrode.

#### IV.4- Résultats et discussion :

##### IV.4.1- Etude sur le polypropylène(PP) :

##### IV.4.1.1- Etude de la conduction électrique :

##### IV.4.1.1.1- Evolution temporelle du courant charge :

##### a) Courant de charge (0 à 1000s).

La figure (IV-5a) montre l'évolution temporelle du courant de charge pour le PP.

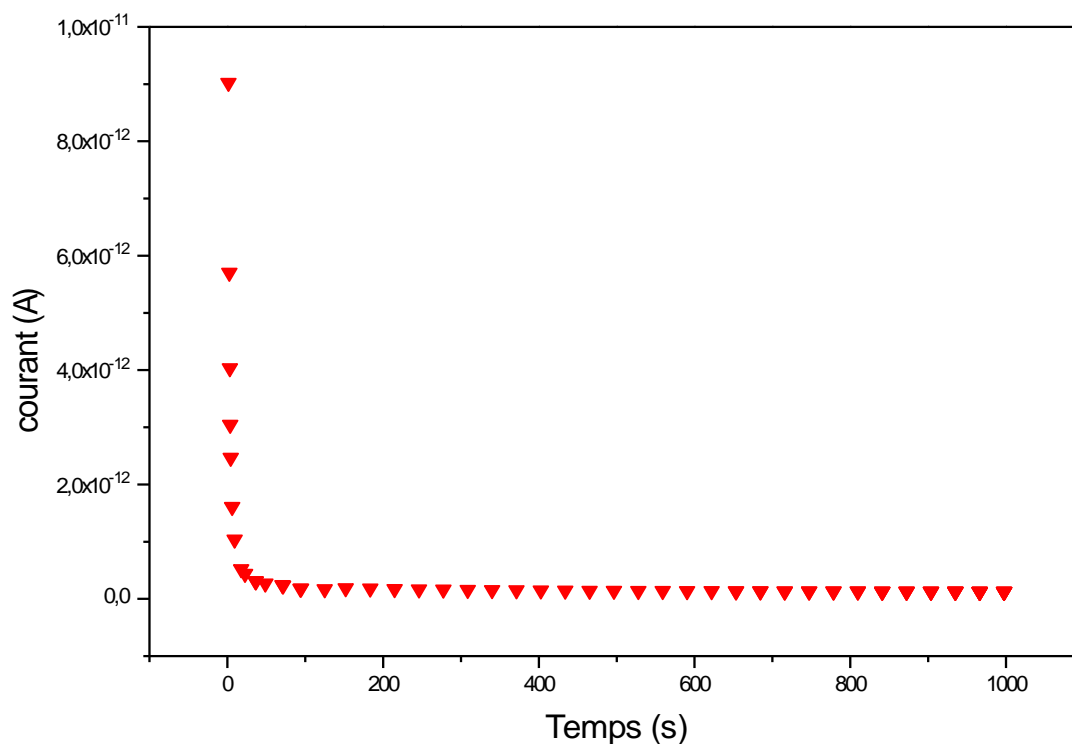
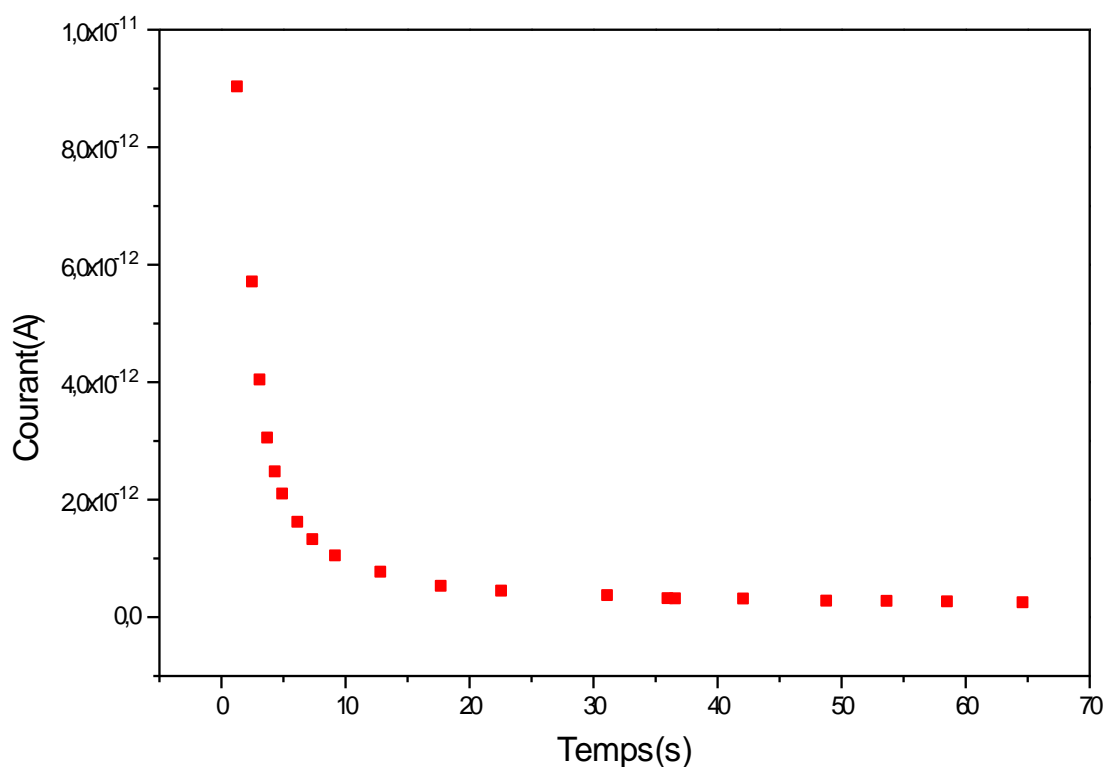


Figure IV.5-a : Variation temporelle du courant de charge du PP neuf.

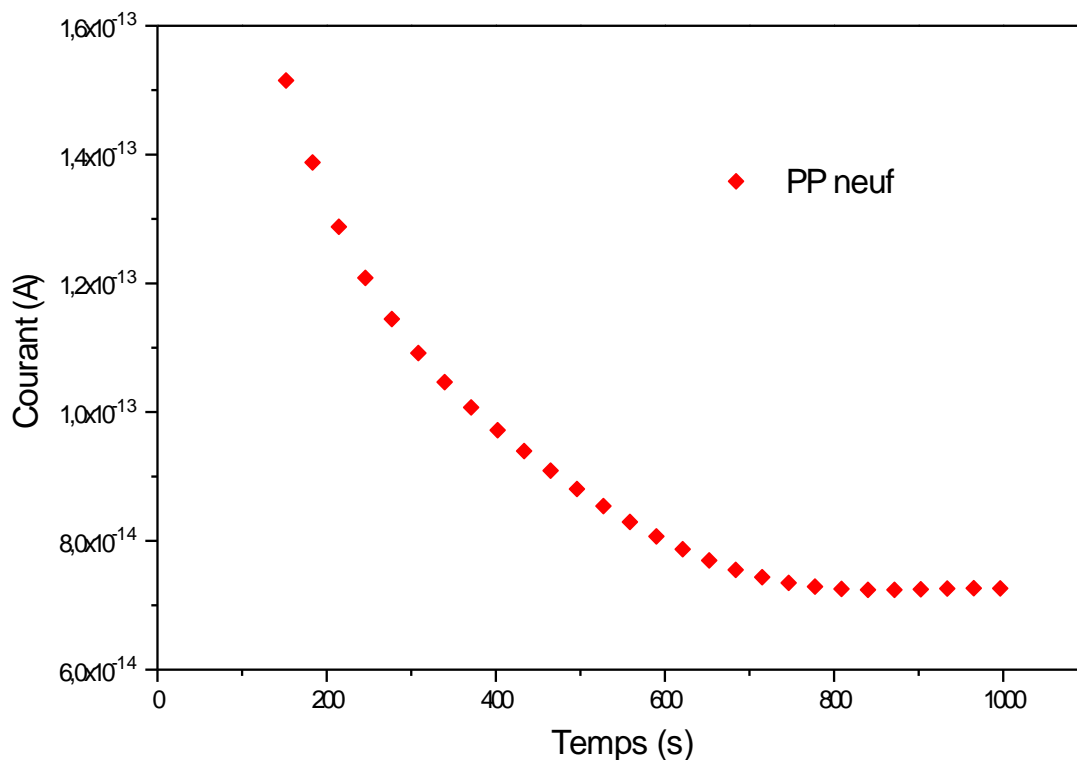
Nous constatons que le courant de charge chute brusquement juste après l'application de la tension de 1000 V continue, puis continue de diminuer lentement avec une tendance vers une saturation. Ces courants comprennent les courants transitoires (polarisation) et permanent (conduction). La frontière entre les deux types de courants n'est pas claire. Pour étudier les deux types de courants, on zoom la plage de 0 à 60 s pour le transitoire, figure (IV-5b), et de 60 à 1000 s pour le courant de conduction, figure (IV-5c). Le courant permanent est atteint au voisinage de 1000 s. Pour cette raison nous avons choisi un temps de charge de 1000 s pour l'étude de la conduction et de l'influence du vieillissement électrique.

**a) Courant transitoire (absorption) (0 à 60s):**



*Figure IV.5-b : Variation temporelle du courant transitoire du PP neuf.*

## b) Courant de conduction (60 à 1000s) :



*Figure IV.5-c : Variation temporelle du courant de conduction du PP neuf.*

**IV.4.1.1.2- Evolution temporelle de courant de décharge (dépolariation):**

On court-circuite les échantillons ( $V=0$  V), juste après la fin de la charge, pendant 1000 s et on suit l'évolution du courant de décharge. Les résultats obtenus sont montrés par la figure (IV.6).

Nous constatons que le courant de décharge est négatif. Ce courant est en sens inverse du courant de charge, croit rapidement durant les premières dizaines secondes, et change de polarité au cours du temps.

La non réversibilité du courant d'absorption et le passage vers les valeurs positives du courant de décharge seraient une conséquence de charge d'espace formée durant le processus de polarisation [10].

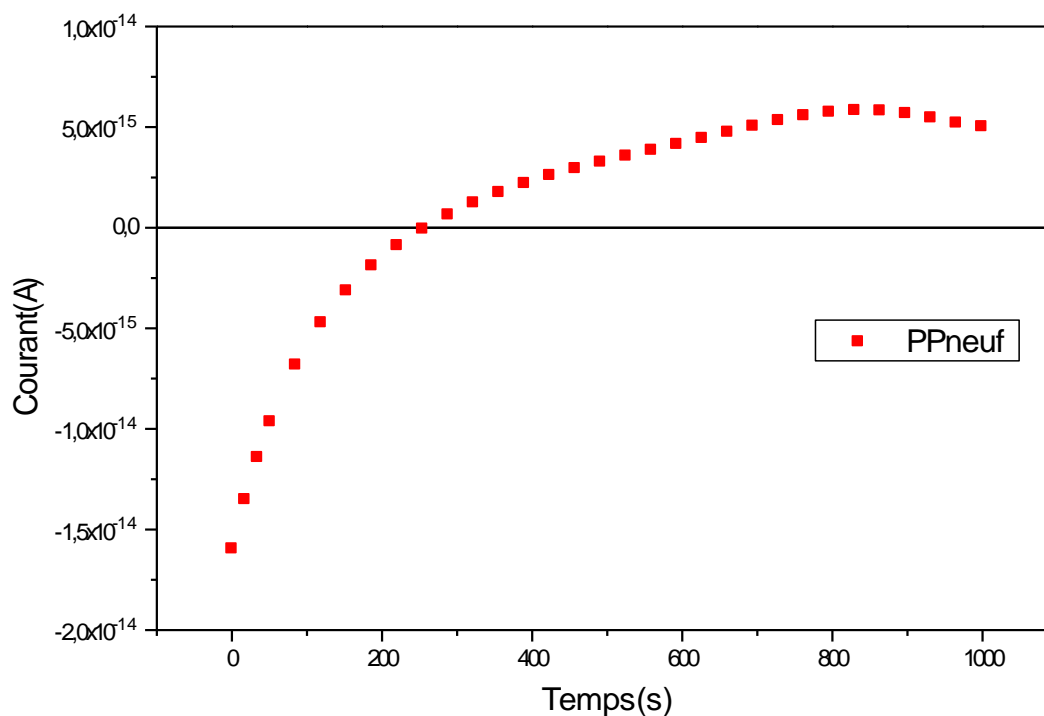


Figure IV.6 : Variation du courant de décharge en fonction du temps de PP neuf.

#### IV.4.1.1.3- Evolution temporelle de la résistivité volumique:

Pour mesurer la résistivité on applique un signal carré de 1000V d'amplitude et 60 s par demi-période comme le prévoit la norme [2].

La figure (IV.7) montre la variation temporelle de la résistivité volumique du PP.

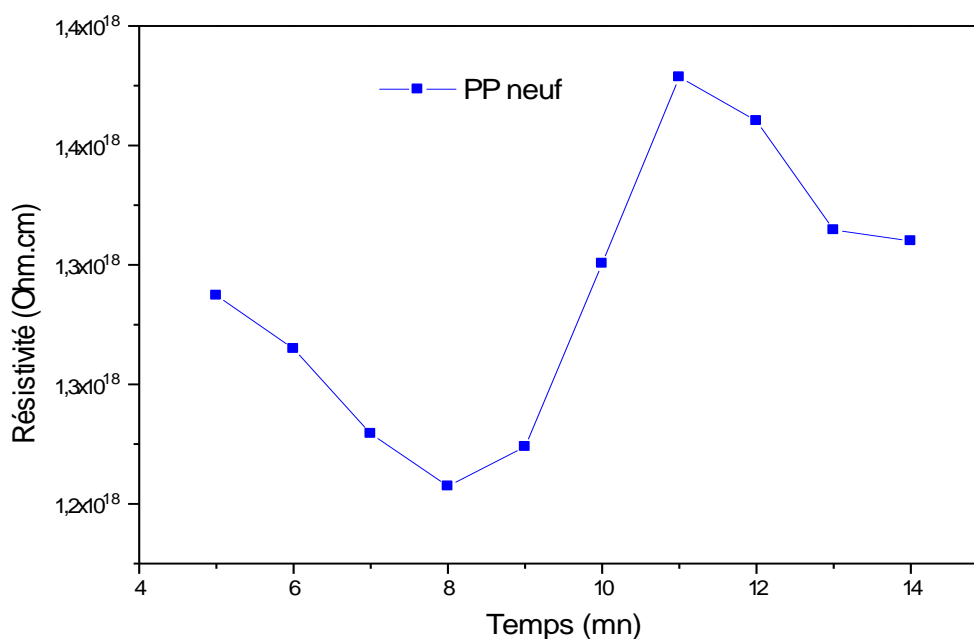
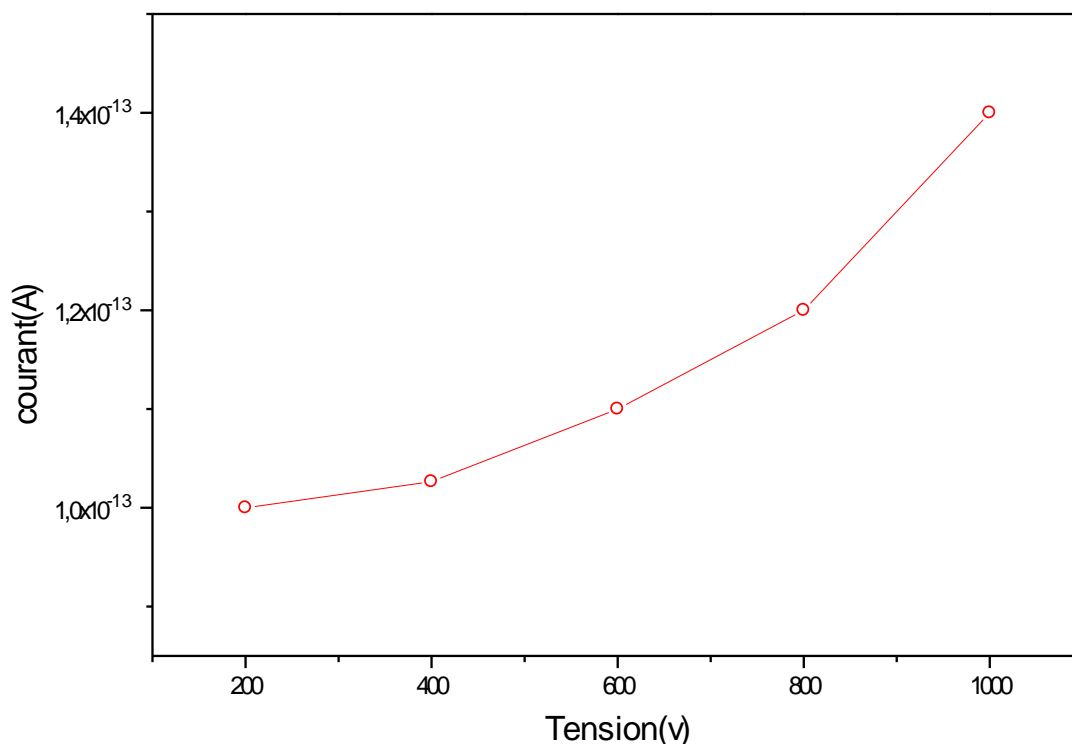


Figure IV.7 : Variation de la résistivité volumique en fonction du temps de PP neuf.

On constate une très légère variation en fonction du temps. Cette variation est de l'ordre de 3 %.

#### IV.4.1.1.4- Caractéristique courant-tension I(V):

Nous constatons qu'à partir de 600 secondes les courants de conduction sont pratiquement constants. Pour la suite de l'étude, le temps choisit sera de 1000s.



*Figure IV.8 : Variation du courant de charge en fonction de la tension du PP neuf.*

Nous constatons que la caractéristique (I-V) de PP est linéaire comme le montre la figure (IV-8). Ceci montre que la conduction est ohmique comme observé pour les autres matériaux polymères sous champ électrique faible ( $E < 0.5$  MV/m) [2].

#### IV.4.1.2- Influence vieillissement électrique sur la conduction électrique :

Les échantillons sont vieillis en appliquant une tension alternative de 10 kV pendant différentes périodes (1 à 8 heures).

Juste après le retrait de l'échantillon, on lui fait subir une charge de 1000 V pendant 1000 s suivit d'une décharge durant le même temps.

**A. Influence sur les courants de conduction :**

La figure (IV.9) présente la variation de courant de conduction du PP en fonction du temps pour différents temps de vieillissement (zoom de 60 s à 1000 s).

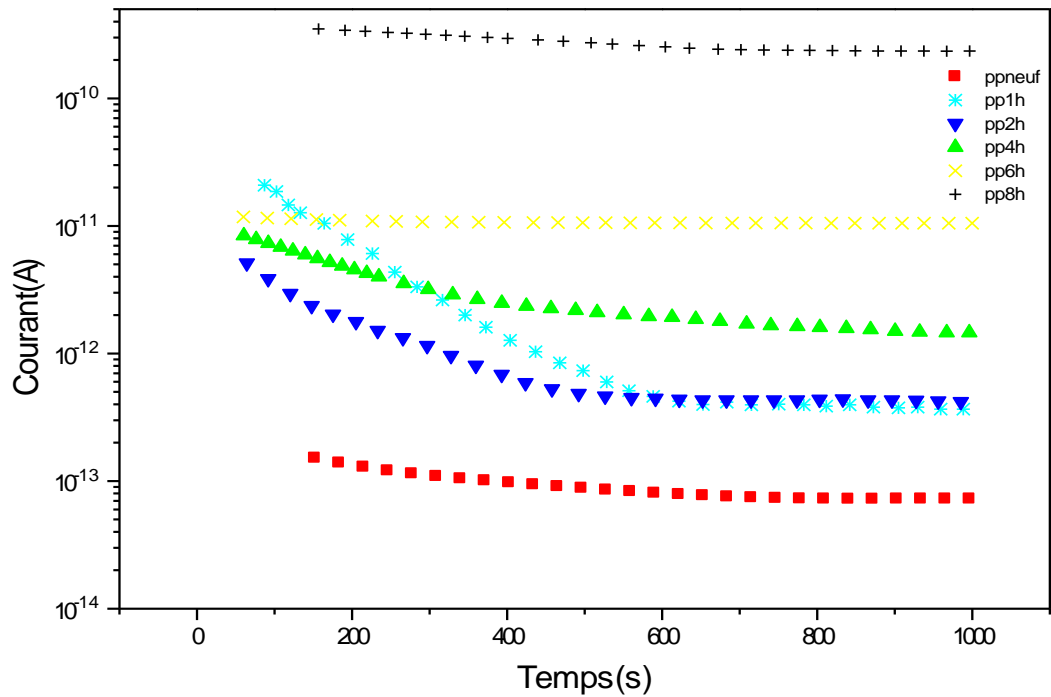


Figure IV.9 : Variation temporelle du courant de conduction pour différents temps de vieillissement du PP.

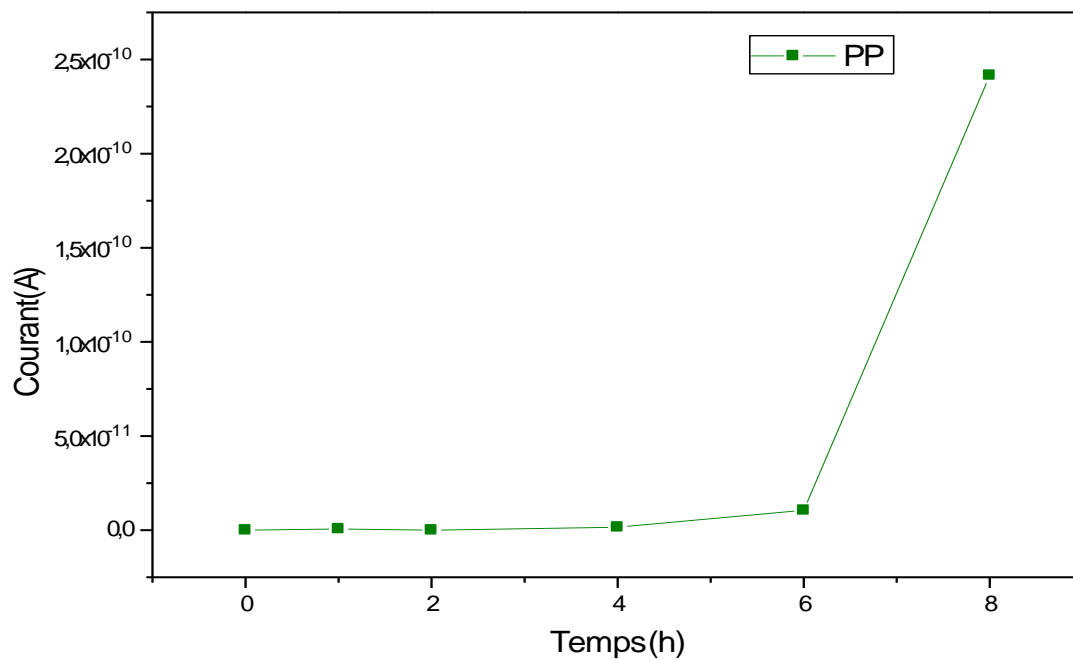
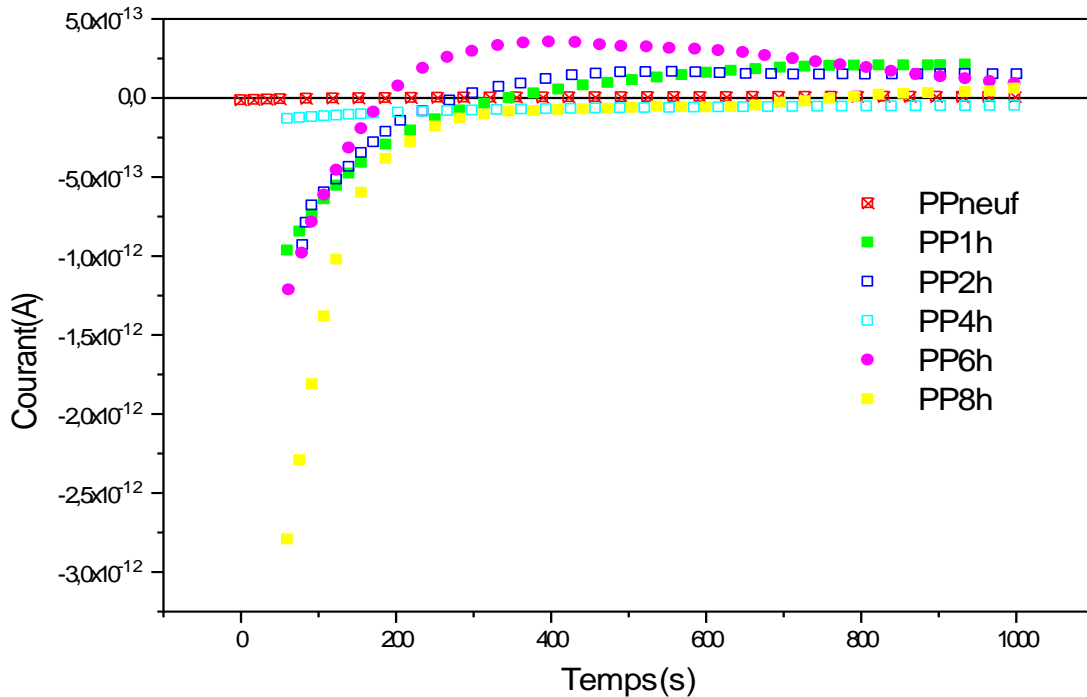


Figure IV.10 : Influence du temps de vieillissement sur le courant de conduction du PP.

La figure (IV-10) montre que le vieillissement électrique a une influence sur le courant de conduction du PP. Cette influence est d'autant plus grande que le temps de vieillissement est important notamment au-delà de 2 heures. En effet, on constate bien que le courant augmente de  $2.94 \cdot 10^{-13} \text{ A}$  après 1h de vieillissement, puis cette valeur passe à  $3.46 \cdot 10^{-13} \text{ A}$  au bout de 2h. Ces valeurs augmentent à  $1.38 \cdot 10^{-12} \text{ A}$  pour 4h de vieillissement et au bout de 6h et 8h successivement ce courant se multiplie d'environ 150 et 3250 fois.

**B. Influence sur les courants de décharge :**



*Figure IV.11 : Variation temporelle du courant de décharge pour différents temps du vieillissement du PP.*

La figure IV.11 montre que le vieillissement électrique n'a pas d'influence significative sur les courants de décharge. On constate, en général que le vieillissement réduit le temps de passage des valeurs négatives vers les valeurs positives. Ceci montre que le vieillissement agit sur la charge d'espace qui se forme durant la polarisation.

**A. Influence sur la résistivité volumique :**

Les figures IV.12 et IV.13 montrent que le vieillissement électrique entraîne une diminution de la résistivité volumique (augmentation de la conductivité). Cette diminution est d'autant plus importante que le temps de vieillissement est grand notamment au-delà de 4 heures

L'application d'une tension alternative (signal carré)  $V = 1000 \text{ V}$  pendant une demi période  $T = 60 \text{ s}$ , permet de mesurer la résistivité.

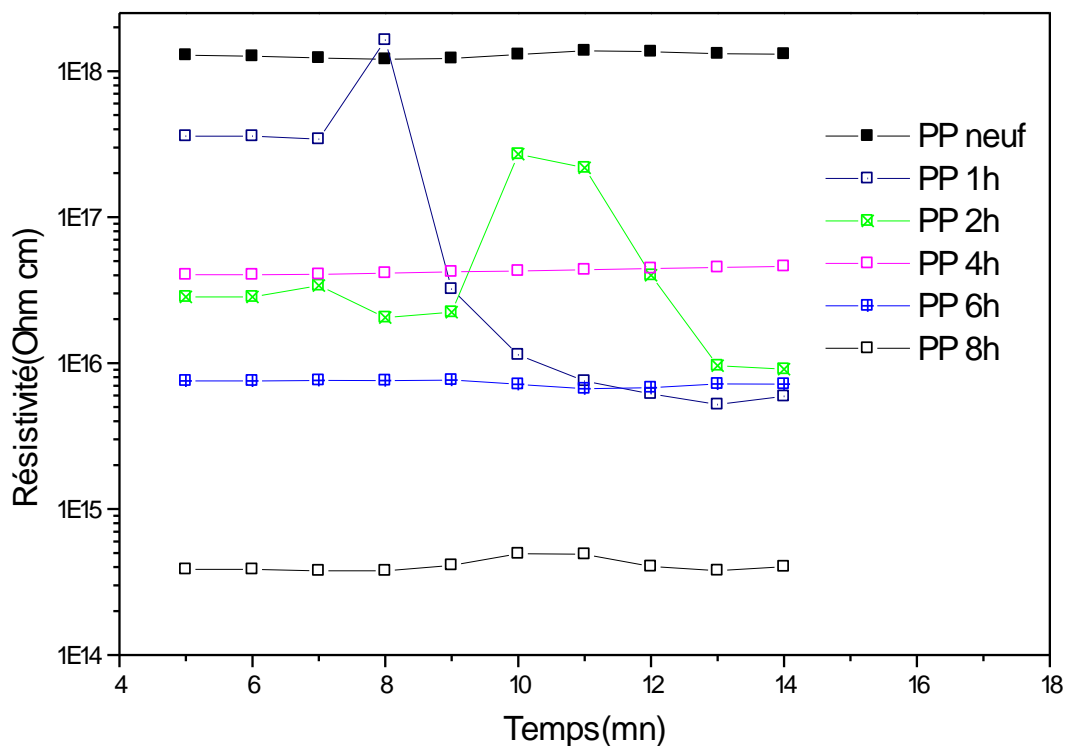


Figure IV.12 : Influence du temps de vieillissement sur la résistivité volumique du PP.

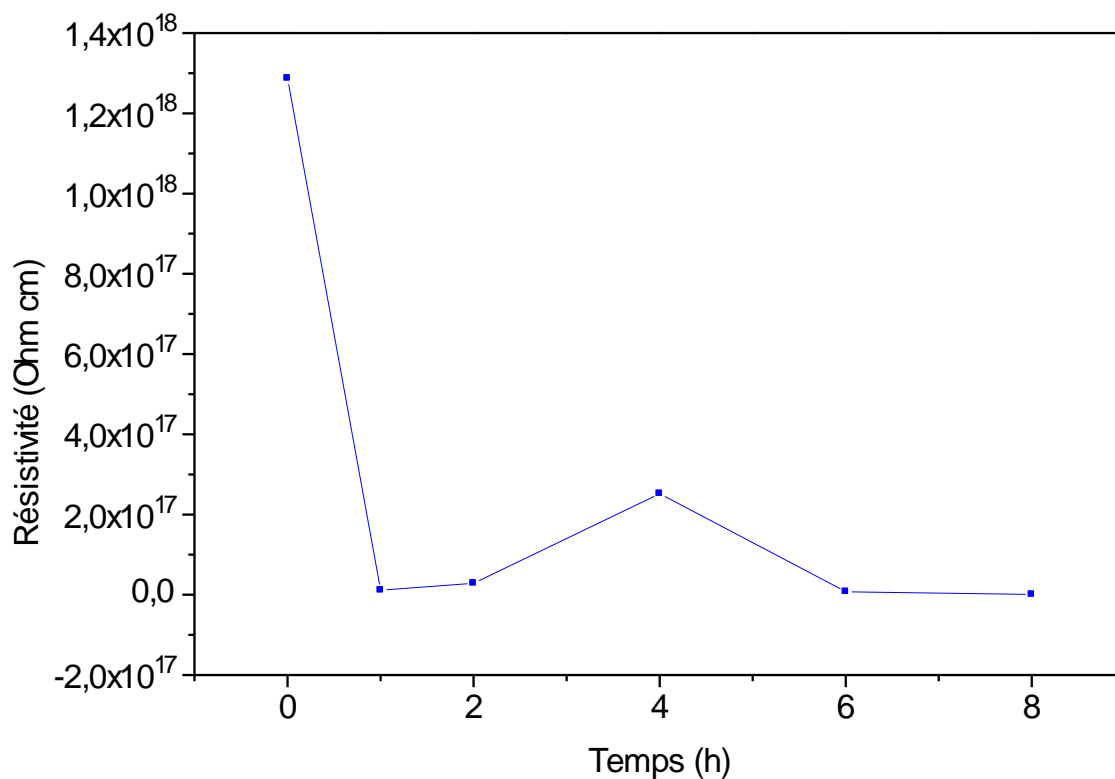
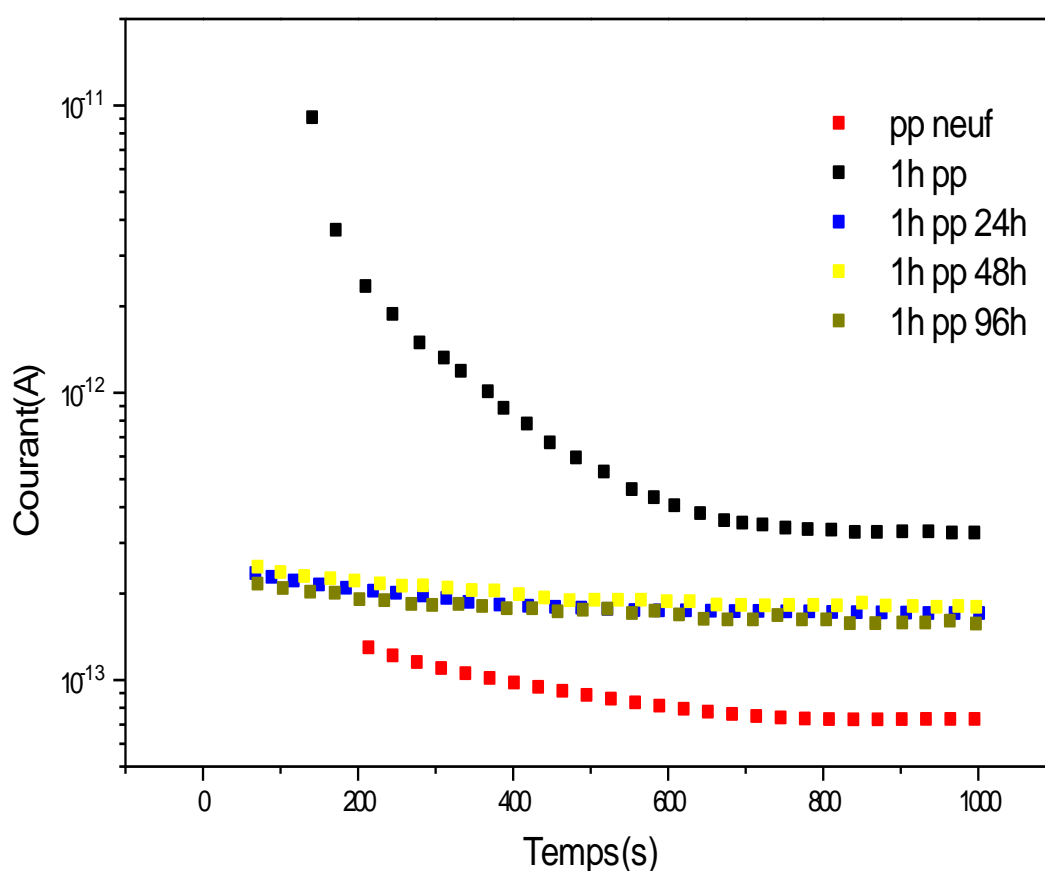


Figure IV-13: Influence du temps de vieillissement sur la résistivité volumique du PP.

### IV.4.1.3- Influence du temps de repos sur la conduction électrique :

Les résultats obtenus pour les différents temps de vieillissement sont montrés par les figures IV.12 à IV.14. On constate que le PP reprend partiellement ses caractéristiques isolantes au bout de quelques jours de repos. Le temps nécessaire pour que le courant se stabilise varie en fonction du temps de vieillissement. Il est d'autant plus important que le temps de vieillissement est grand. Il est d'un jour pour 1 heure de vieillissement et de quelques jours pour un vieillissement de 8 heures.

#### A. Influence sur les courants de conduction :



*Figure IV.14 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PP vieilli durant 1heure.*

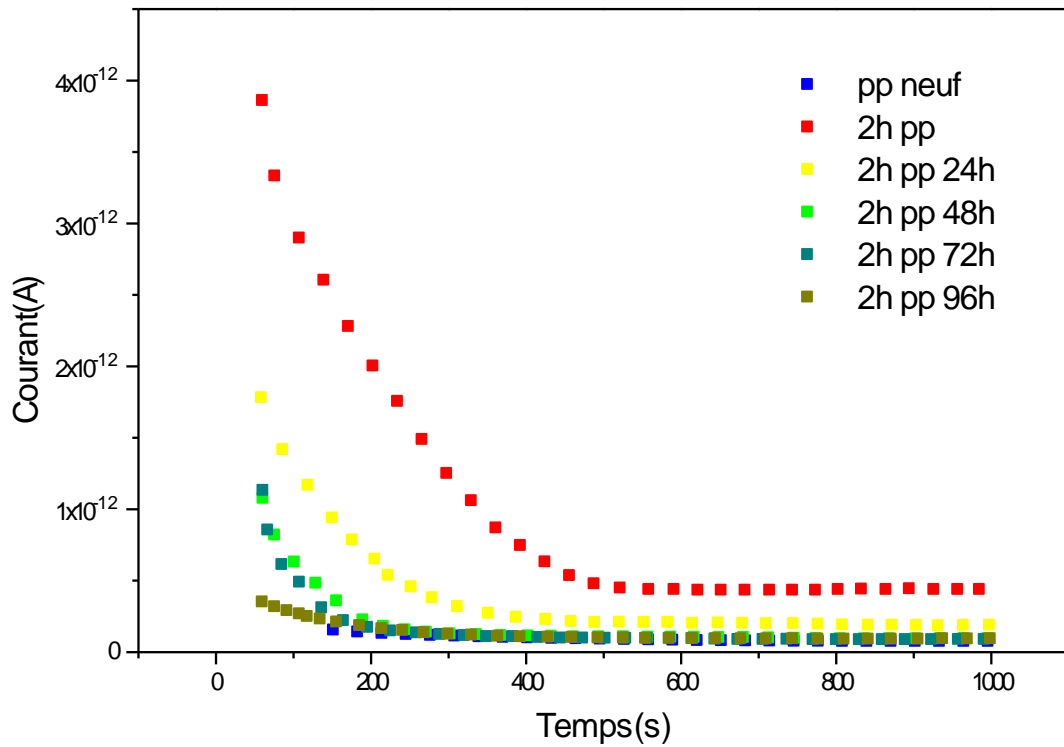


Figure IV.15 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PP vieilli durant 2 heures.

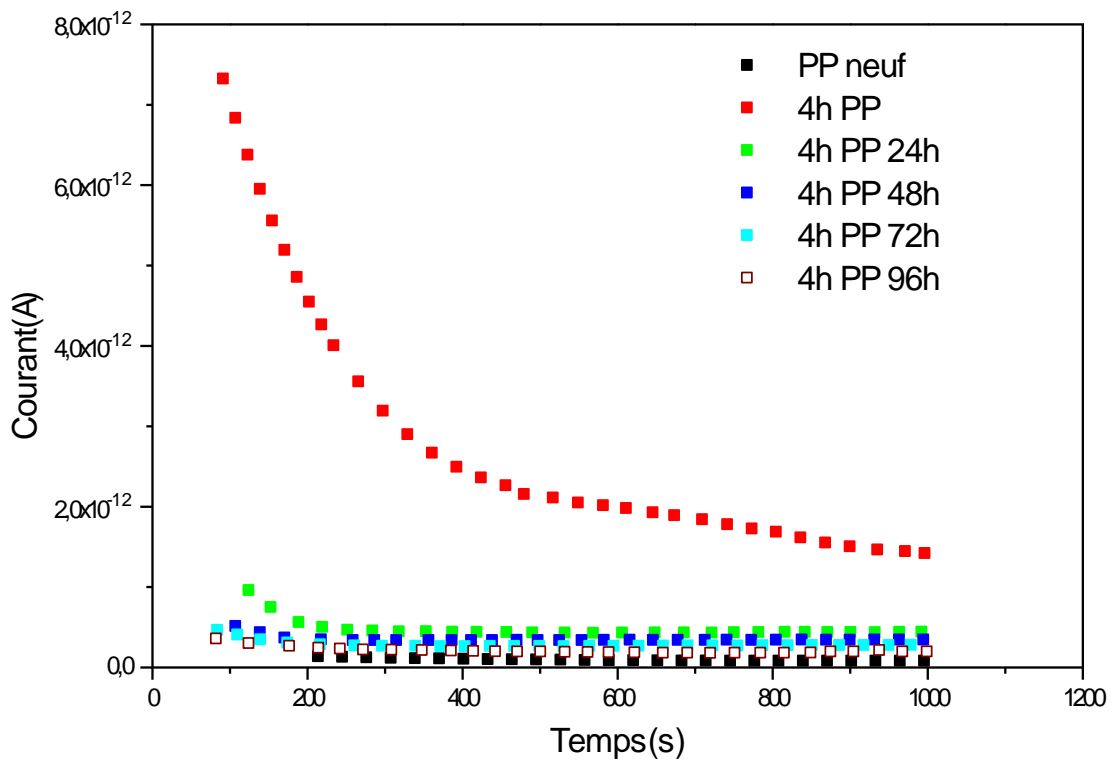


Figure IV.16 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PP vieilli durant 4 heures.

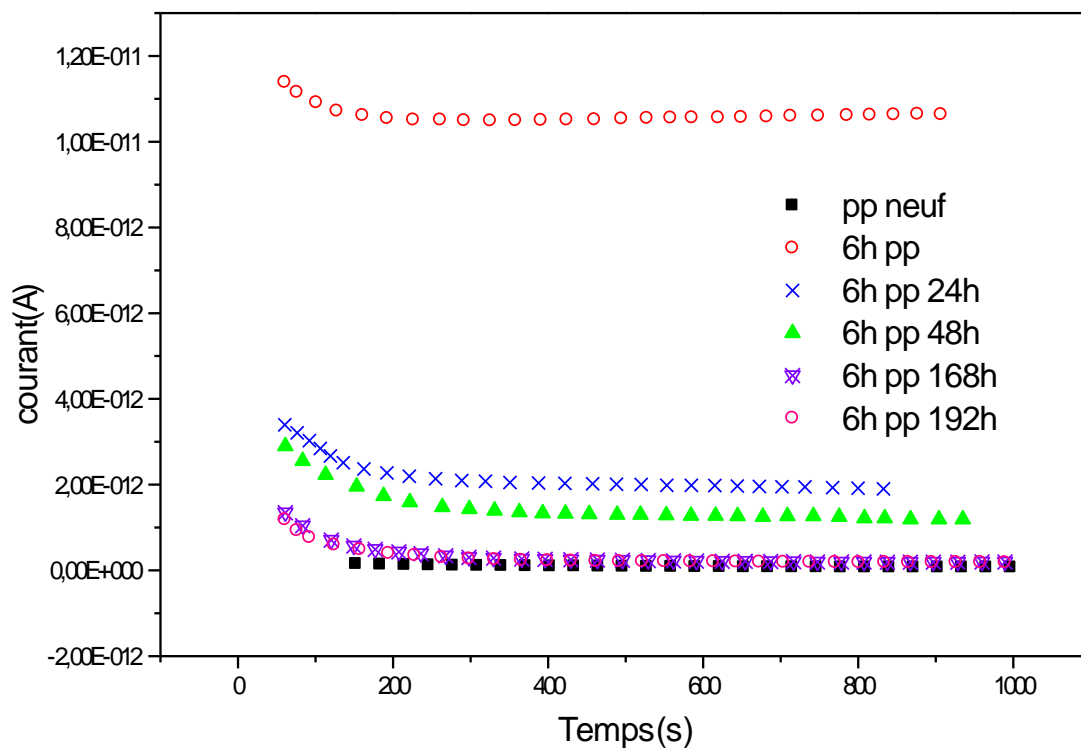


Figure IV.17 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PP vieilli durant 6 heures.

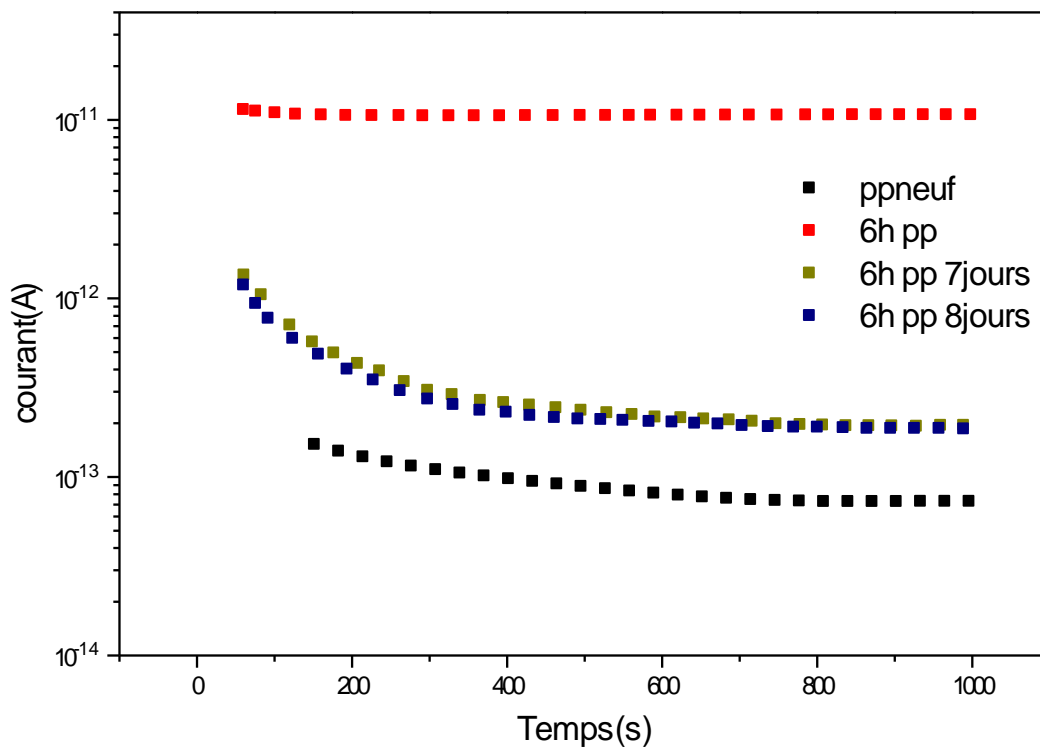


Fig. IV.18 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PP vieilli durant 6heures pour le 7<sup>ième</sup> et 8<sup>ième</sup> jour de repos.

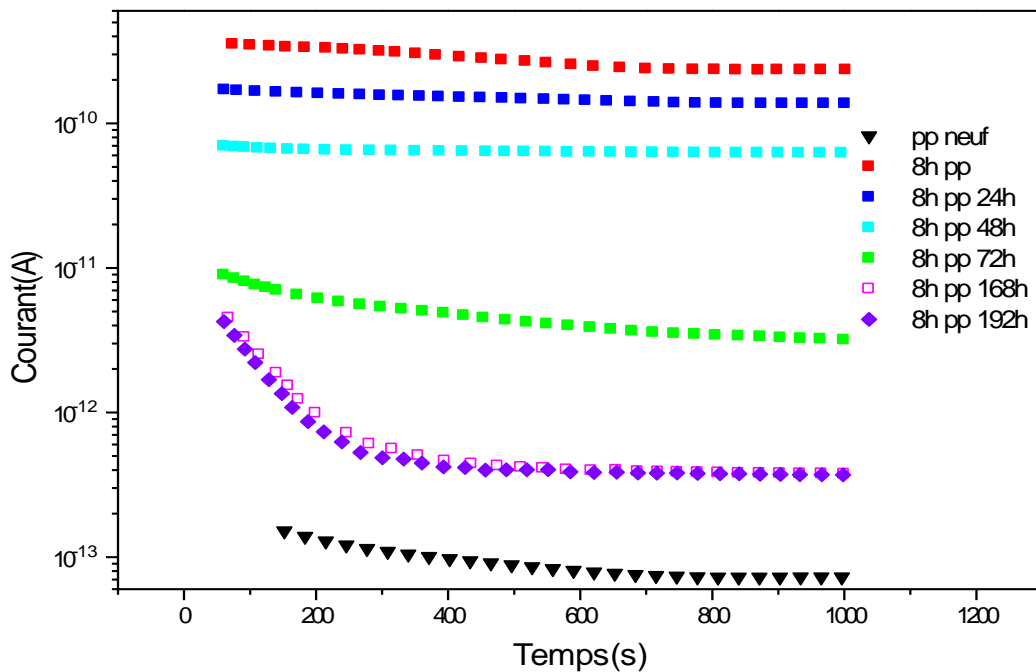


Figure IV.19 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PP vieilli durant 8 heures.

**B. Influence sur la résistivité volumique :**

Pour chaque temps de vieillissement, on va étudier la variation de la résistivité volumique en fonction de temps de repos.

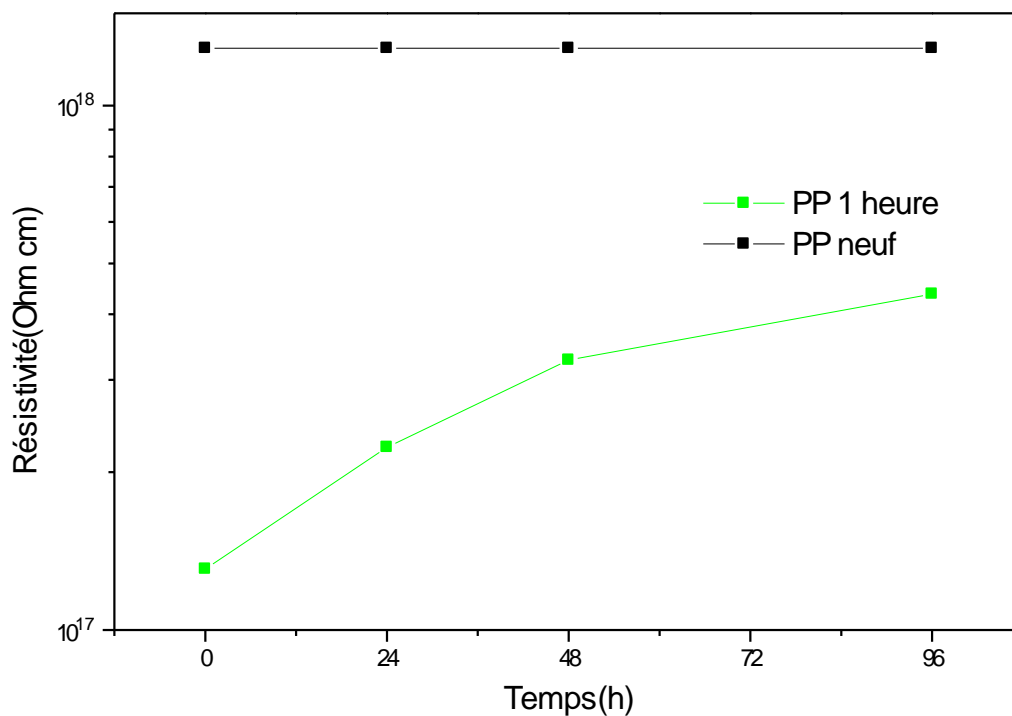


Figure IV. 20 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PP vieilli durant 1 heure.

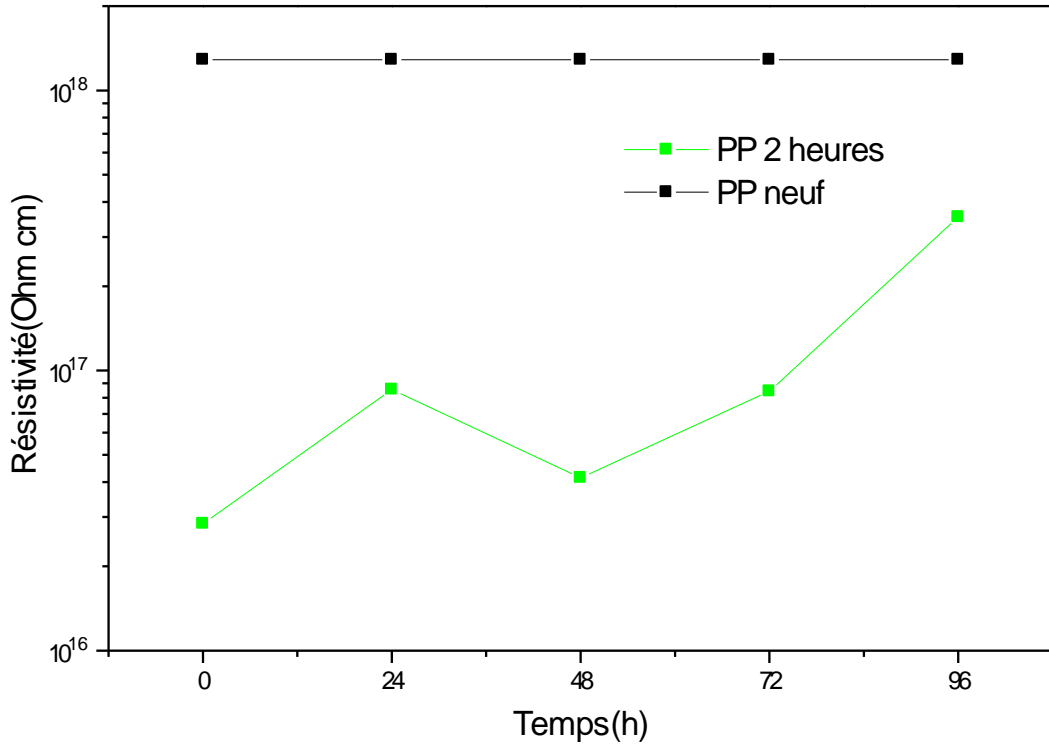


Figure IV. 21 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PP vieilli durant 2 heures.

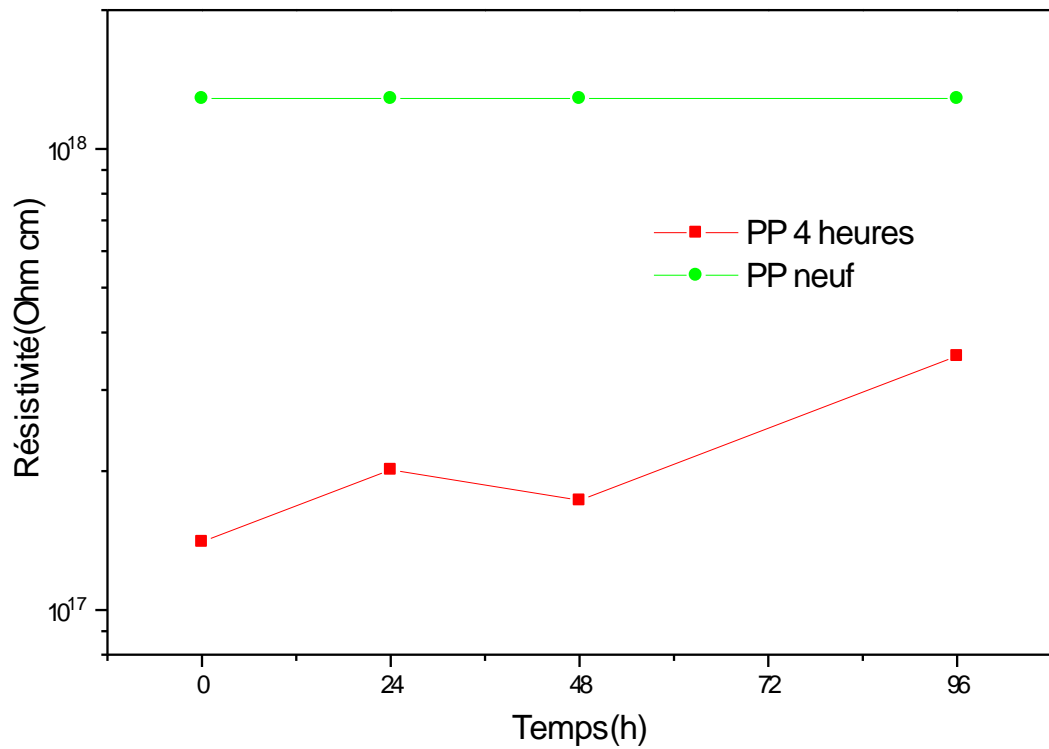


Figure IV.22 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PP vieilli durant 4 heures.

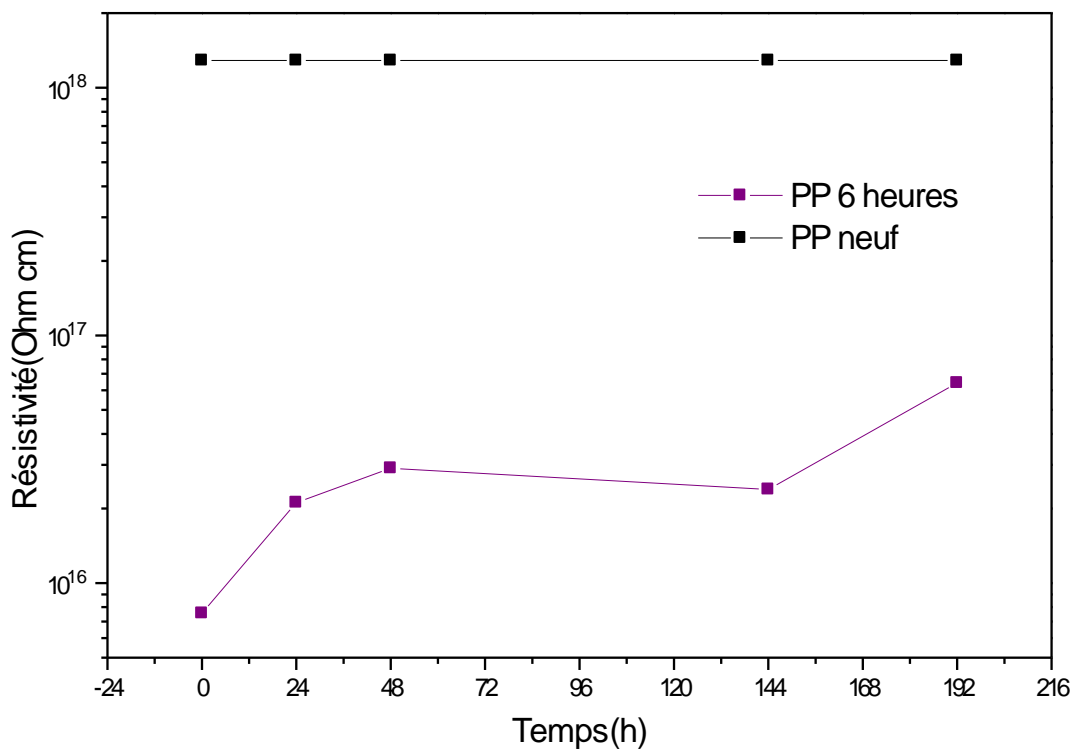


Figure IV. 23 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PP vieilli durant 6 heures.

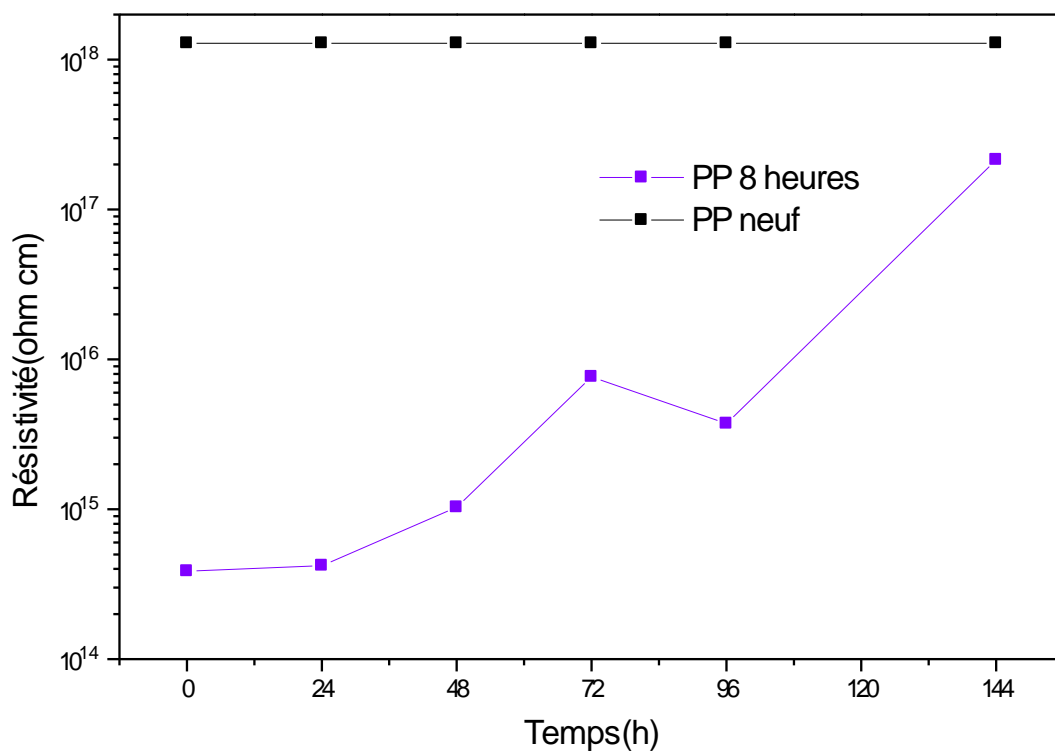


Figure IV. 24 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PP vieilli durant 8 heures.

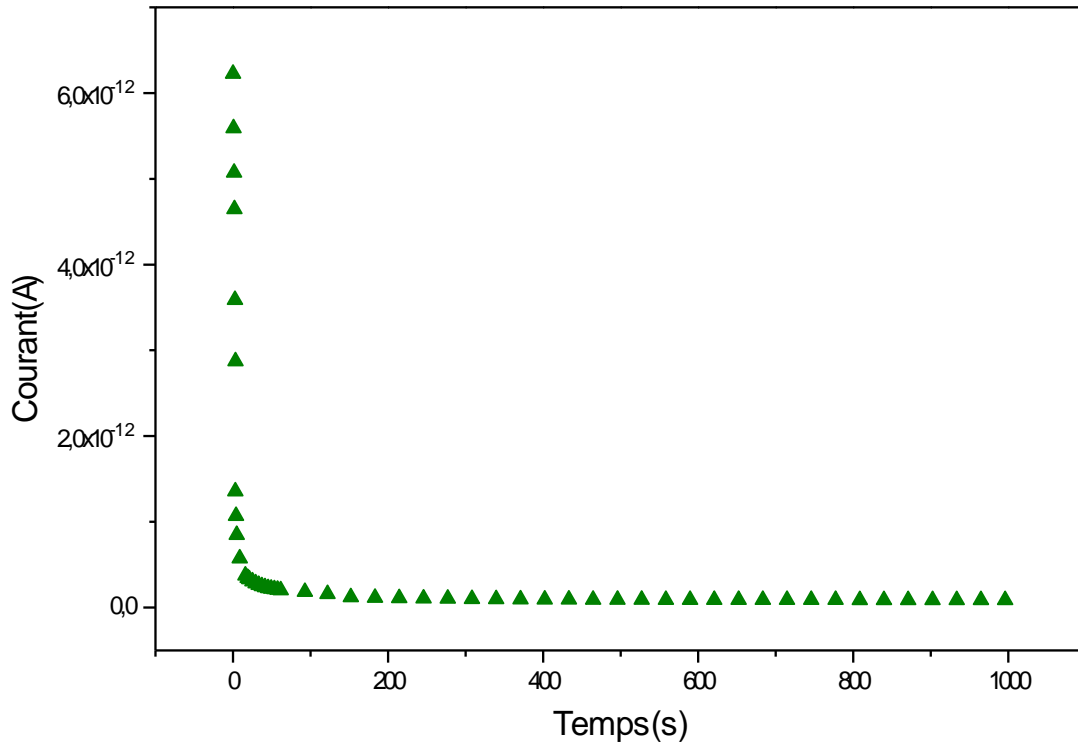
## IV.4.2- Etude sur polystyrène (PS) :

### IV.4.2.1- Etude de la conduction électrique :

#### IV.4.2.1.1- Evolution temporelle du courant de charge :

##### a) Courant de charge (0 à 1000s) :

La figure (IV.25-a) montre l'évolution temporelle du courant de charge pour le PS.



*Figure IV.25.a : Variation temporelle du courant de charge du PS neuf.*

On constate que le courant de charge de PS chute brusquement juste après l'application de la tension de 1000 V continue, puis continue de diminuer lentement avec une tendance vers une saturation.

##### b) Courant transitoire (absorption) (0 à 60s) :

La figure (IV.25.b) c'est le zoom la plage de 0 à 60 s pour le courant transitoire de PS.

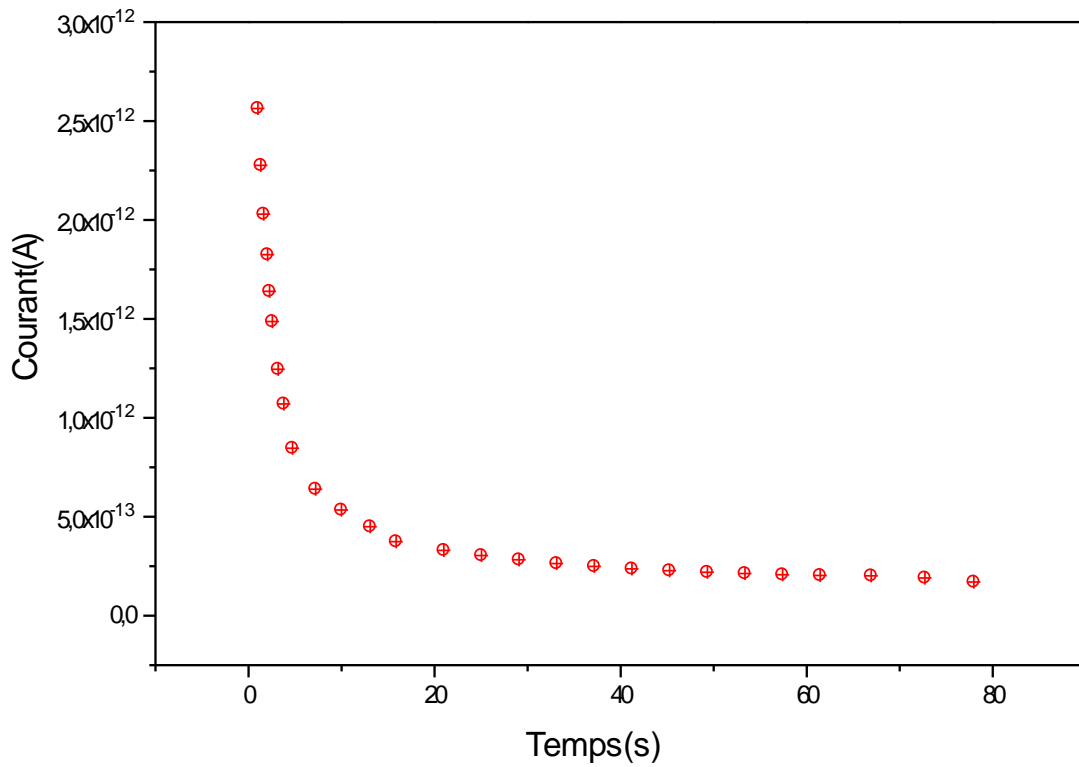


Figure IV.25.b : Variation temporelle du courant transitoire du PS neuf.

c) Courant de conduction (60s à 1000s) :

La figure (IV.25.c) présente le courant de conduction ou bien le courant permanent de 60 à 1000 s pour le PS.

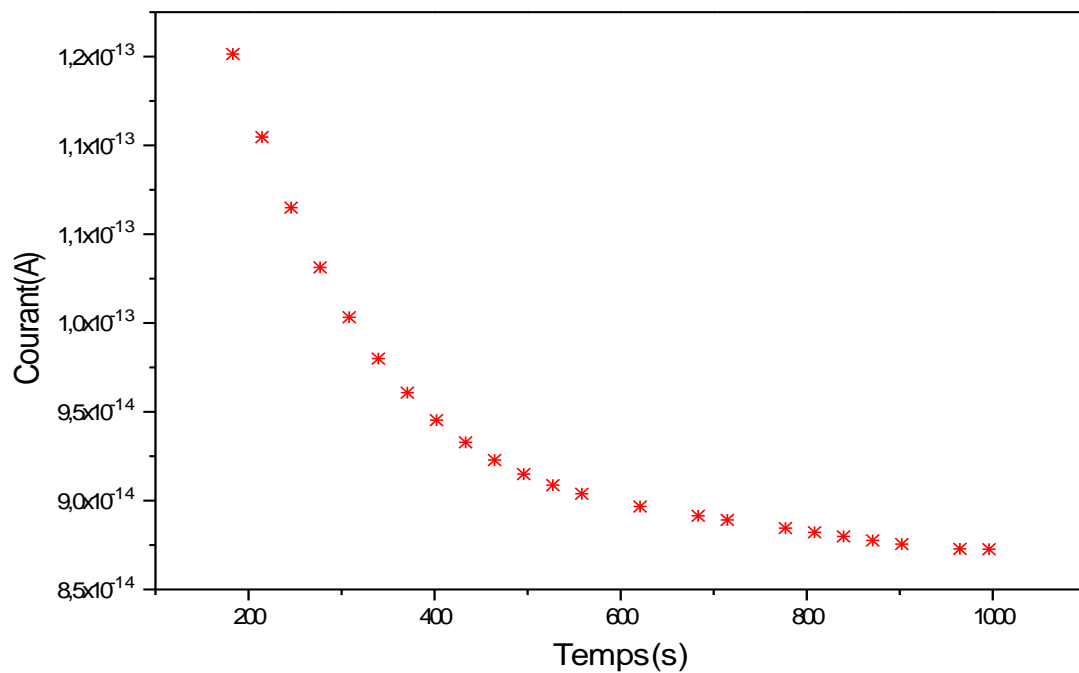
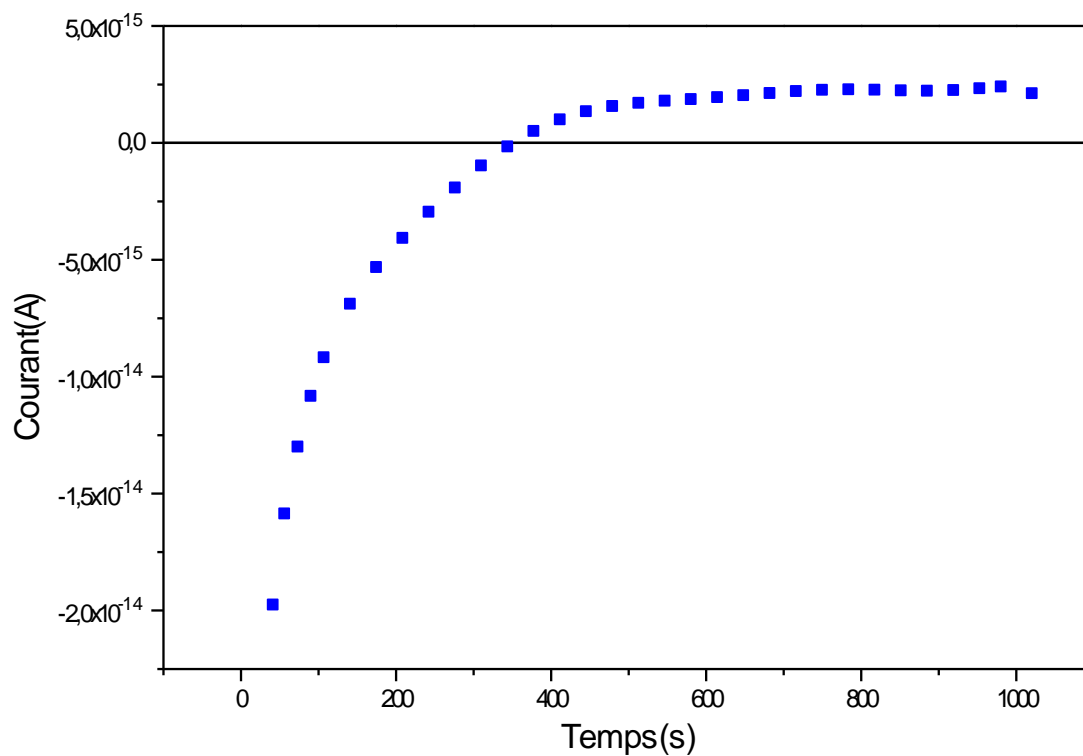


Figure IV.25.c : Variation temporelle du courant de conduction du PS neuf.

#### IV.4.2.1.2- Evolution temporelle du courant décharge (dépolariation) :



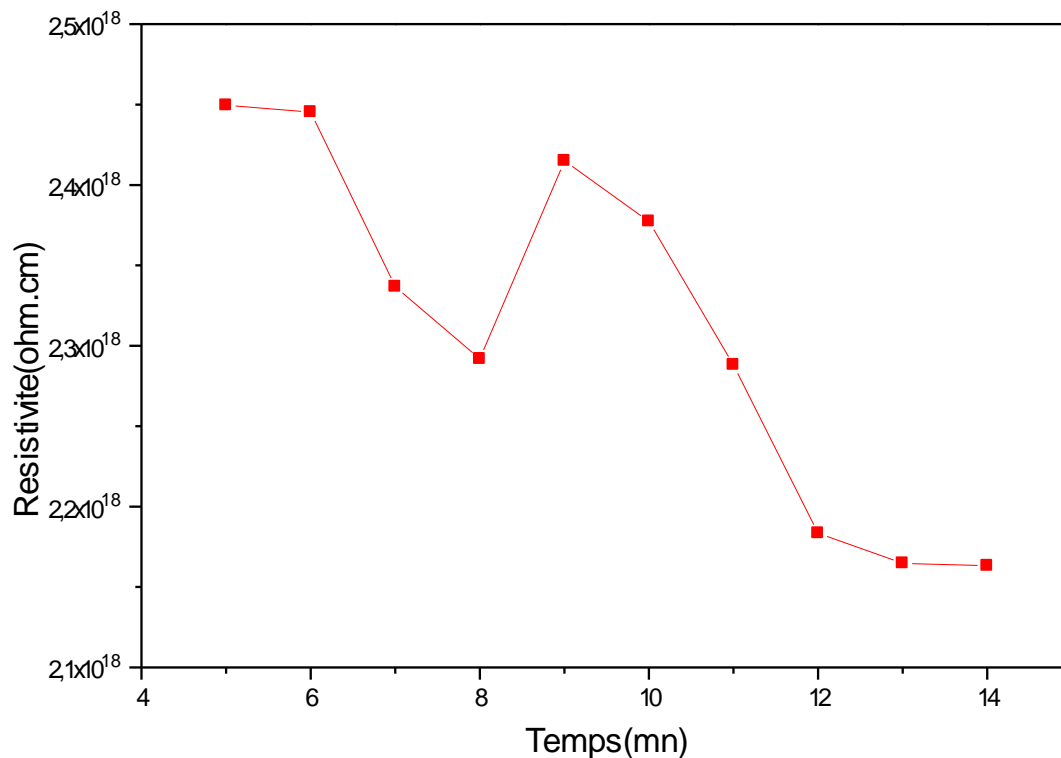
*Figure IV.26 : Variation du courant de décharge en fonction du temps.*

On court-circuite les échantillons ( $V=0$  V), juste après la fin de la charge, pendant 1000 s et on suit l'évolution du courant de décharge. Les résultats obtenus sont montrés par la figure (IV-26).

Nous constatons que le courant de décharge est négatif. Ce courant en sens inverse du courant de charge et croit rapidement durant les premières secondes, et change de polarité au cours du temps (voir la figure IV-26).

#### IV.4.2.1.3- Evolution temporelle de la résistivité volumique :

Le résultat représenté par la figure (VI-27) montre bien que la résistivité volumique diminue légèrement en fonction du temps d'application du champ électrique.



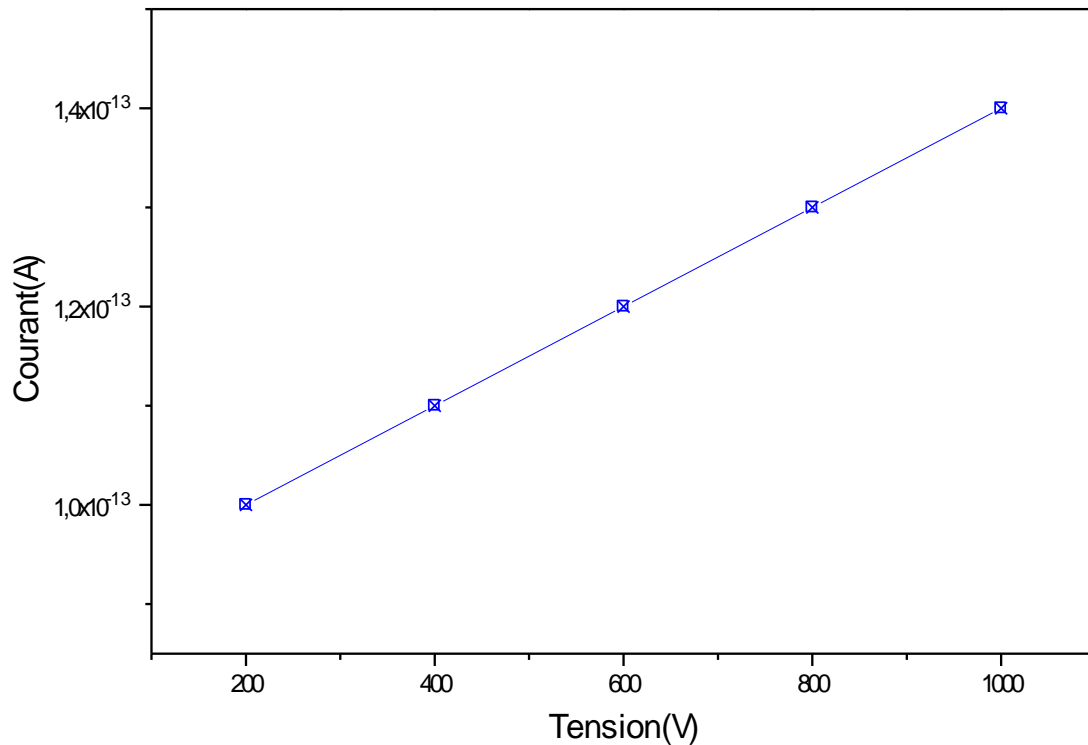
*Figure IV.27 : Variation de la résistivité volumique en fonction du temps.*

On constate une légère variation en fonction du temps. Cette variation est de l'ordre de 10 %.

#### **IV.4.2.1.4- Caractéristique courant-tension I(V) :**

Le courant permanent est atteint au voisinage de 1000 s. Pour cette raison nous avons choisi un temps de charge de 1000 s pour l'étude de la conduction.

Nous constatons que la caractéristique d'I-V de PS est linéaire comme le montre la figure (IV-28). Ceci montre que la conduction est ohmique comme observé pour les autres matériaux polymères sous champ électrique faible.



*Figure IV.28 : Variation du courant de charge en fonction de la tension du PS.*

#### **IV.4.2.2- Influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique :**

##### **a) Influence sur les courants de conduction :**

La figure (IV-29) présente la variation de courant de conduction du PS en fonction du temps pour différents temps de vieillissement (zoom de 60 s à 1000 s).

Les figures (IV-29) et (IV-30) montrent que le vieillissement électrique a une influence sur le courant de conduction du PS. Cette influence est d'autant plus grande que le temps de vieillissement est important notamment au-delà de 2 heures.

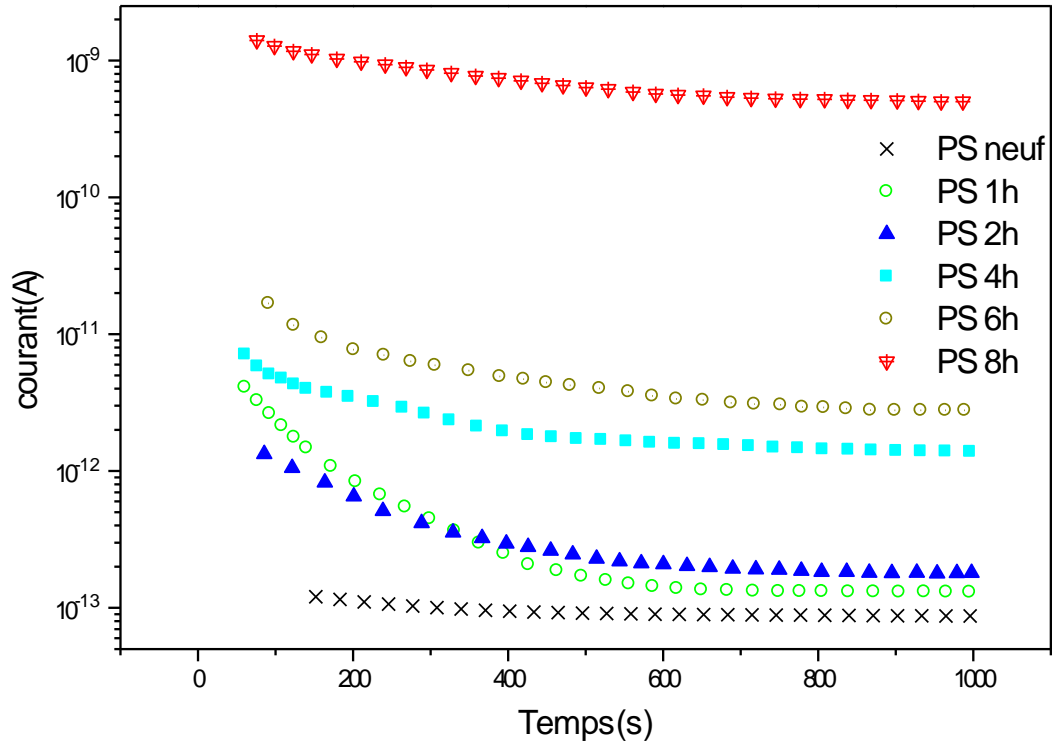


Figure IV.29 : Variation temporelle du courant de conduction pour différents temps du vieillissement du PS.

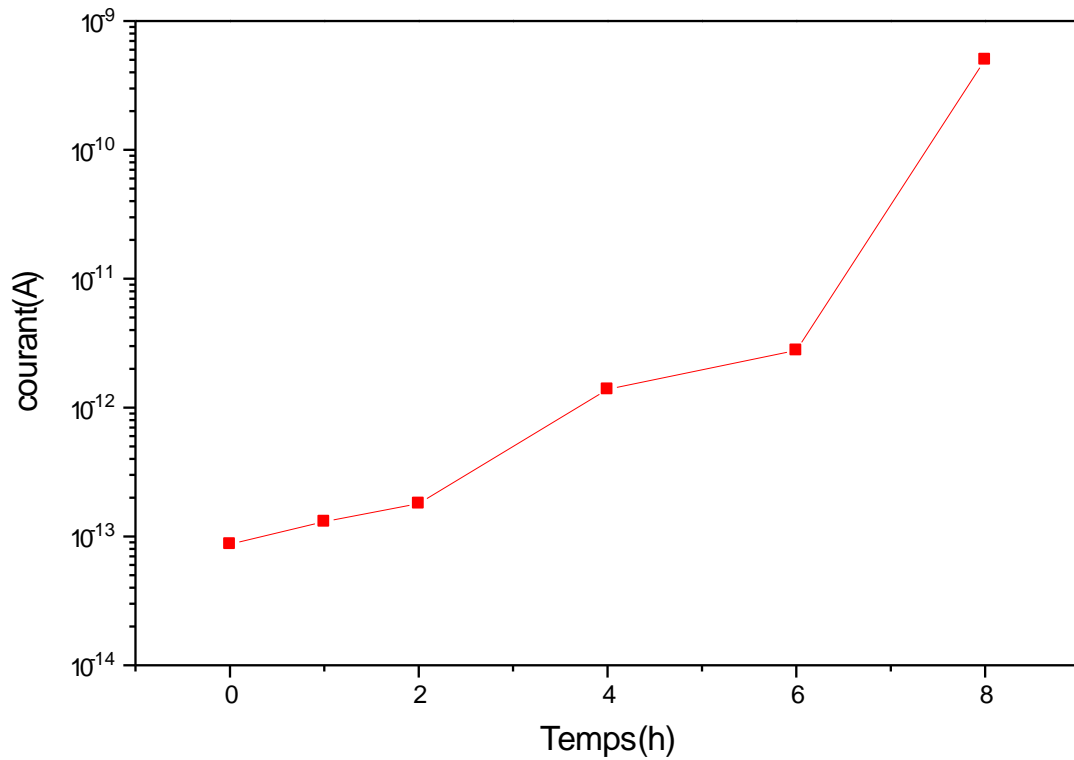
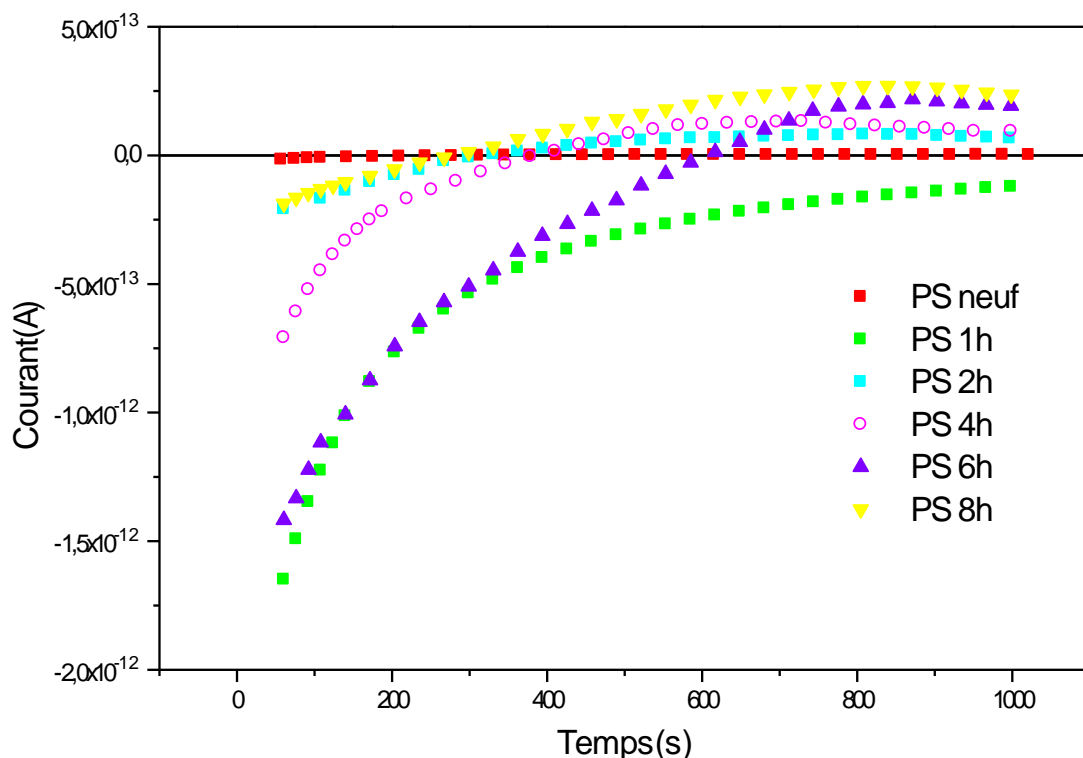


Figure IV.30 : Influence du temps de vieillissement sur le courant de conduction du PS.

En effet, on constate bien que le courant augmente de  $4.3 \cdot 10^{-14}$  A après 1h de vieillissement, puis cette valeur passe à  $9.2965 \cdot 10^{-14}$  A au bout de 2h. Ces valeurs augmentent à  $1.3 \cdot 10^{-12}$  A pour 4h de vieillissement et au bout de 6h et 8h successivement ce courant se multiplie d'environ 32 et 5747 fois.

D'après la figure (IV.30), on constate que le courant de conduction du PS augmente avec l'augmentations de temps de vieillissement.

**b) Influence sur les courants de décharge :**



**Figure IV.31 :** Variation temporelle du courant de décharge pour différents temps de vieillissement du PS.

Le vieillissement augmente le courant de décharge du PS. Cette augmentation continue avec le temps de vieillissement, avec un passage vers les valeurs positives, puis le courant de décharge diminue. Le temps de vieillissement n'a pas d'influence significative sur les courants de décharges.

**c) Influence sur la résistivité volumique :**

La figure (VI.32) présente l'influence de temps de vieillissement sur la résistivité volumique de PS.

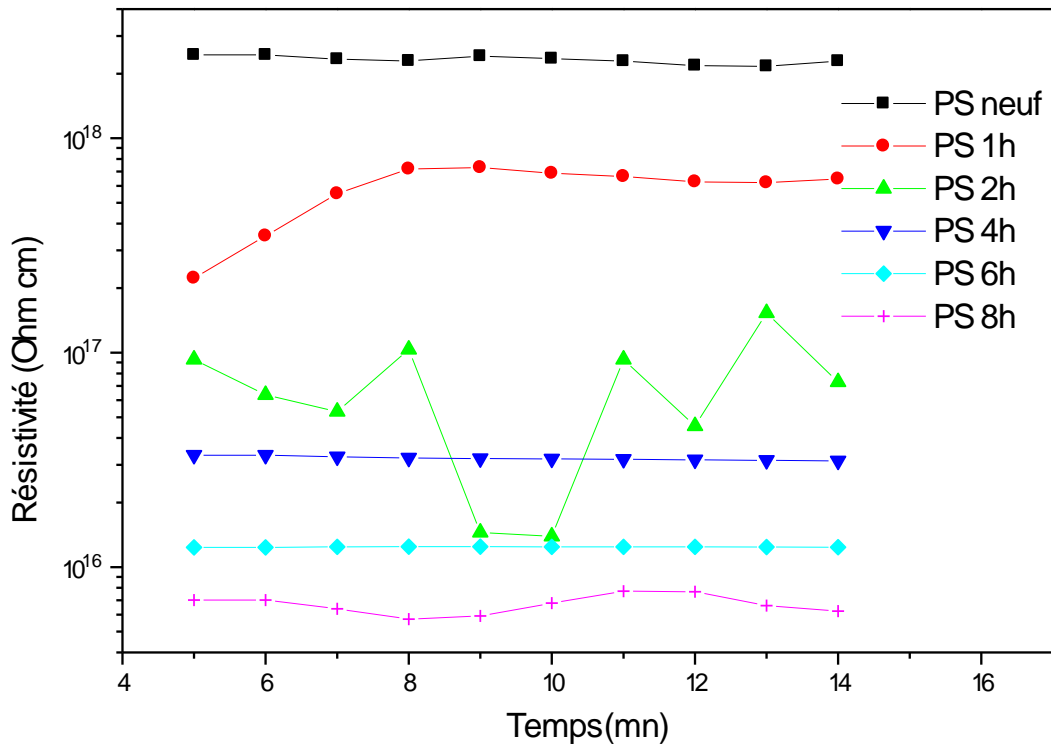


Fig. IV.32 : Variation temporelle de la résistivité volumique pour différents temps du vieillissement du PS.

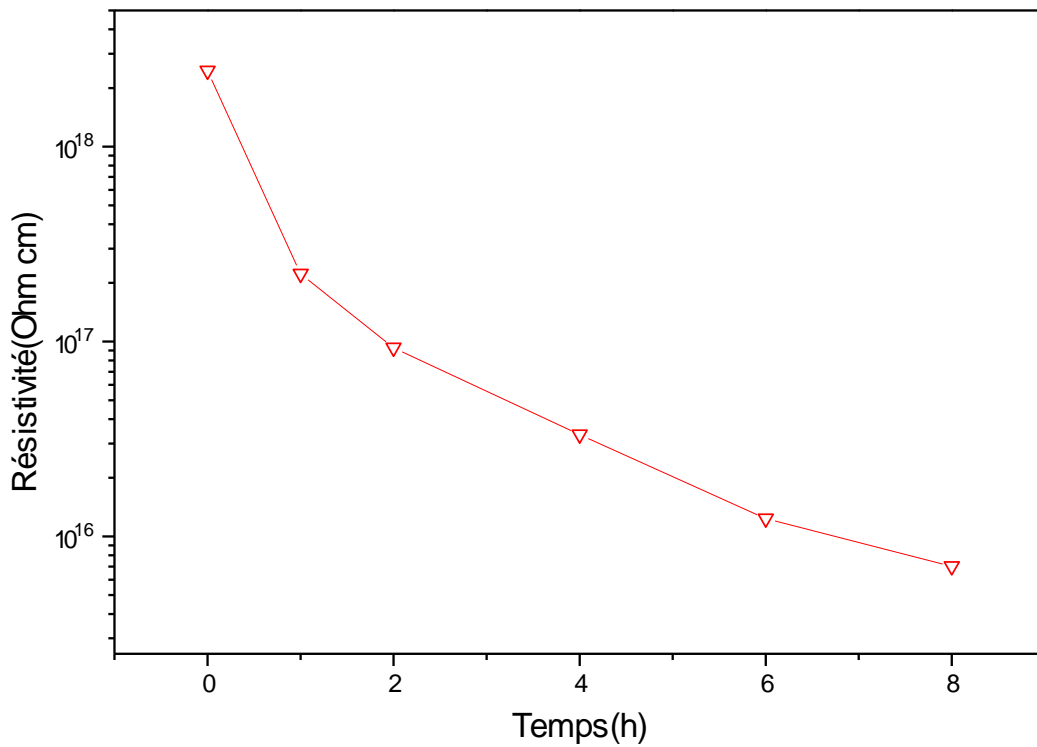


Fig. IV.33: Variation de la résistivité volumique en fonction de temps de vieillissement du PS.

Nous constatons que la résistivité volumique diminue avec le vieillissement sans qu'il y ait une influence significative du temps de vieillissement. D'après les figures (IV-32) et (VI-33).

#### IV.4.3- Influence du temps de repos sur la conduction électrique :

Concernant l'influence du temps de repos sur le courant de conduction, on remarque que le courant a une tendance à diminuer sans atteindre la valeur du courant de conduction des échantillons vierges. En effet le courant du PS vieilli pendant 8 heures et laissé au repos pendant 120 heures diminue jusqu'à  $3,2353 \cdot 10^{-13}$  A.

Pour chaque temps de vieillissement, on va étudier la variation de courant de conduction pour différents temps de repos, d'après ces résultats le PS récupère partiellement ses caractéristiques isolantes. Voir les figures suivantes.

##### IV.4.3.1- Influence sur le courant de conduction :

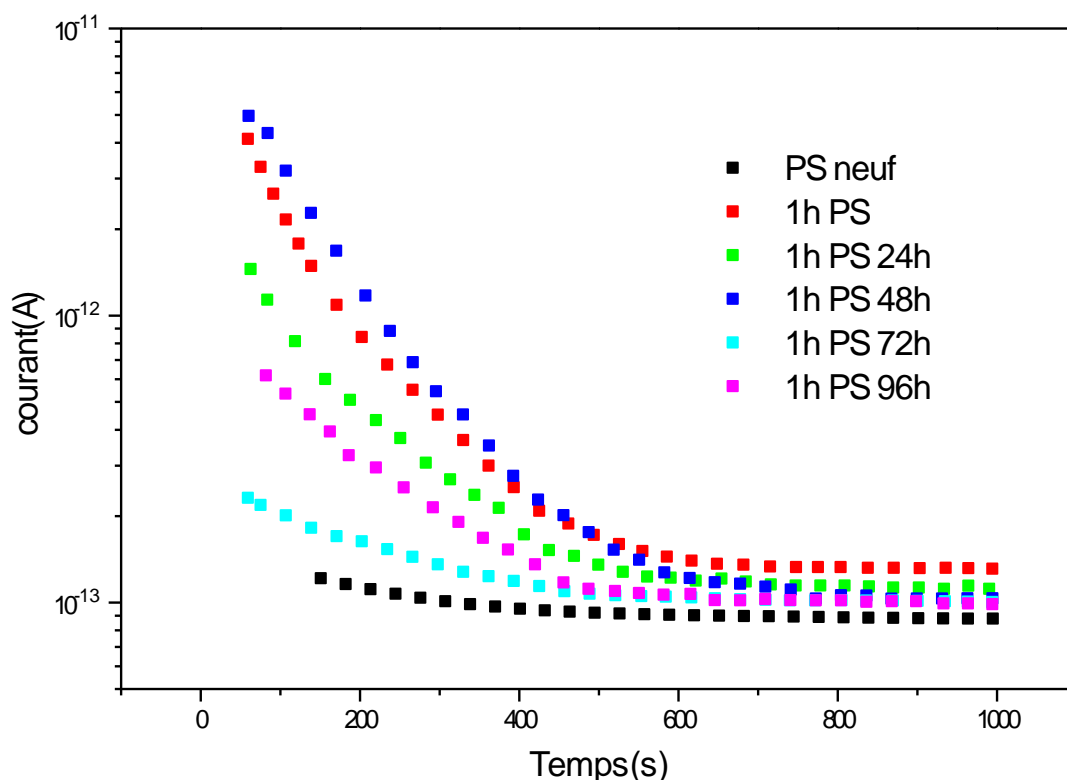


Figure IV.34 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli durant 1 heure.

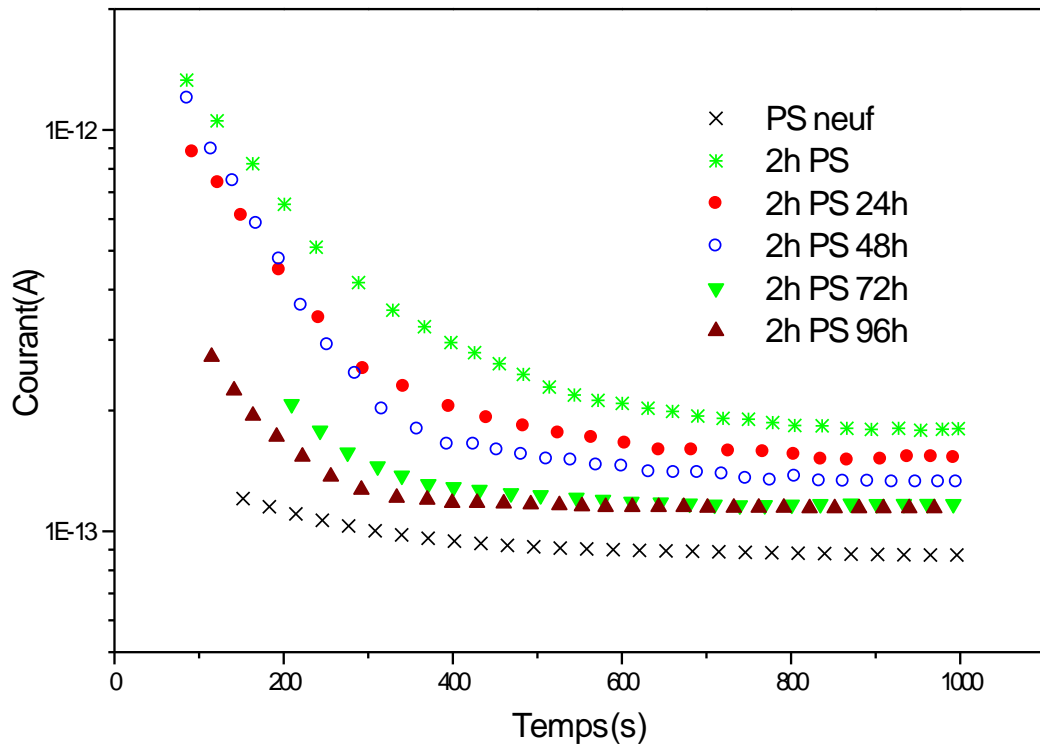


Figure IV.35 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli durant 2 heures.

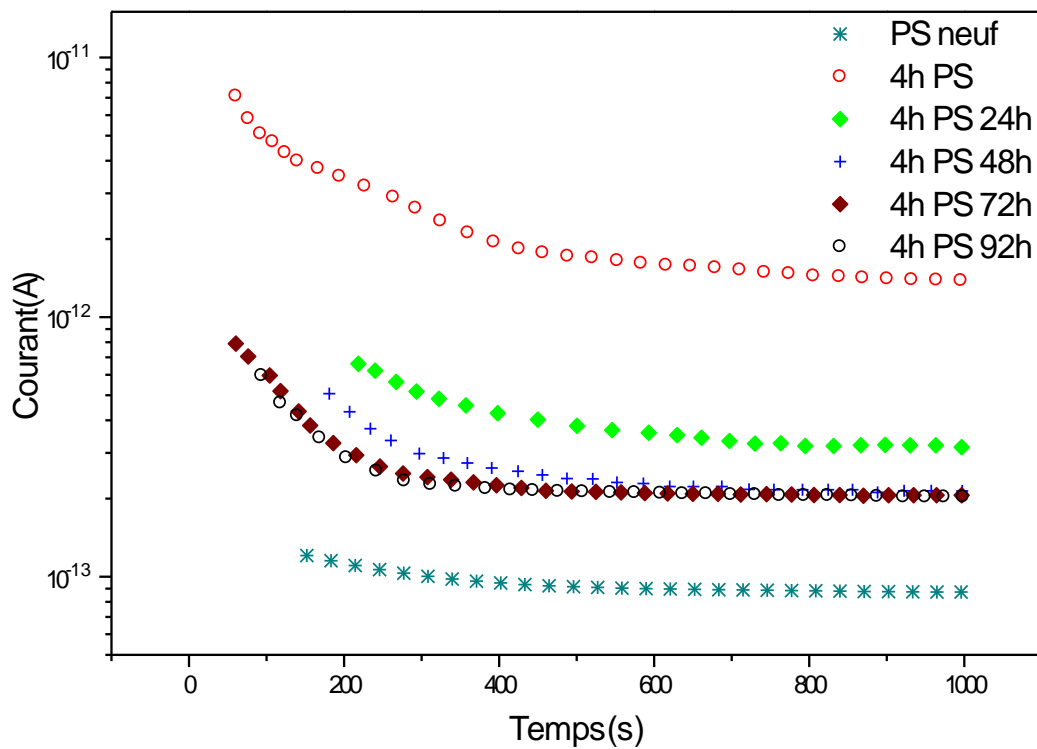


Figure IV.36 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli durant 4 heures.

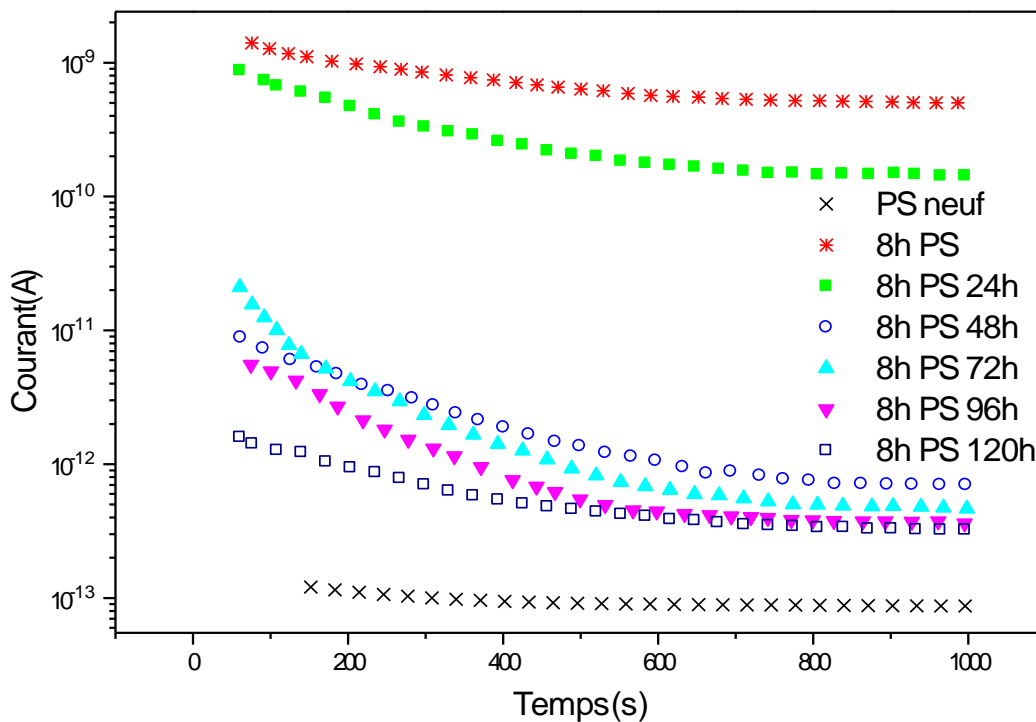


Figure IV.37 : Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli durant 8 heures.

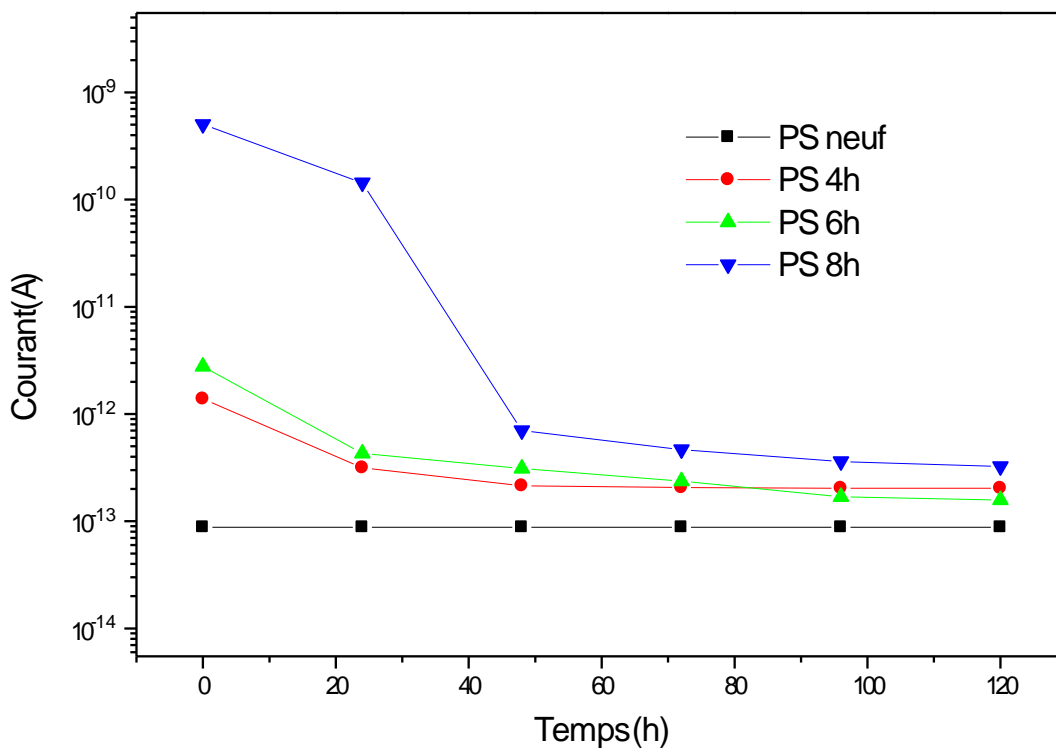


Figure IV.38 : Influence du temps de repos sur les courants de conduction du PS vieilli durant (4h, 8h et 6h).

IV.4.3.2- Influence sur la résistivité volumique :

Pour chaque temps de vieillissement, on va étudier la variation de la résistivité volumique en fonction de temps de repos.

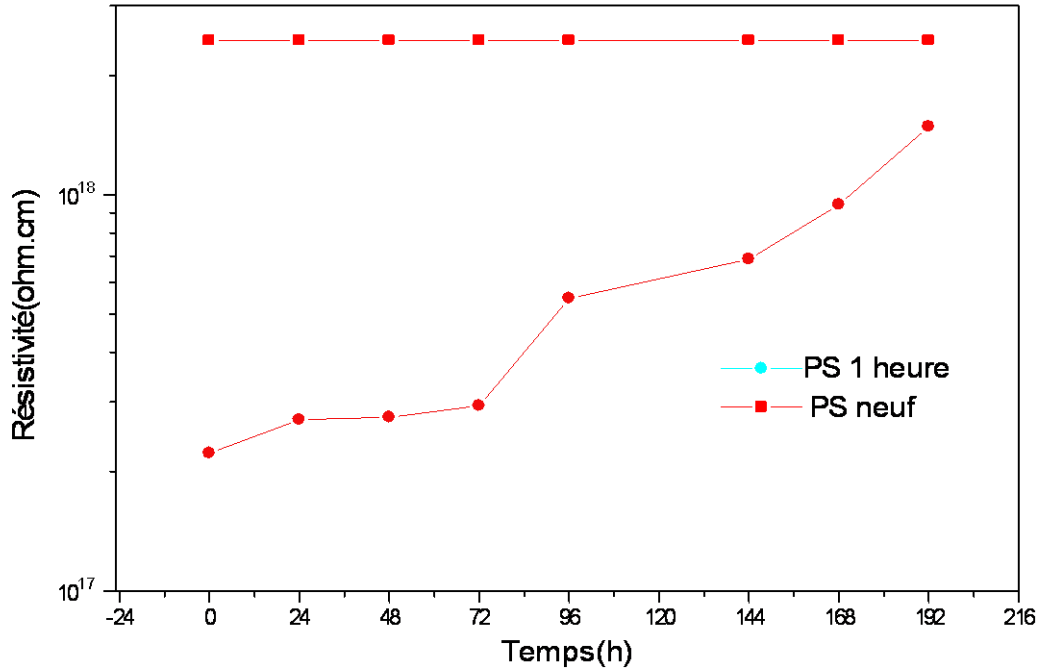


Figure IV. 39 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli durant 1 heure.

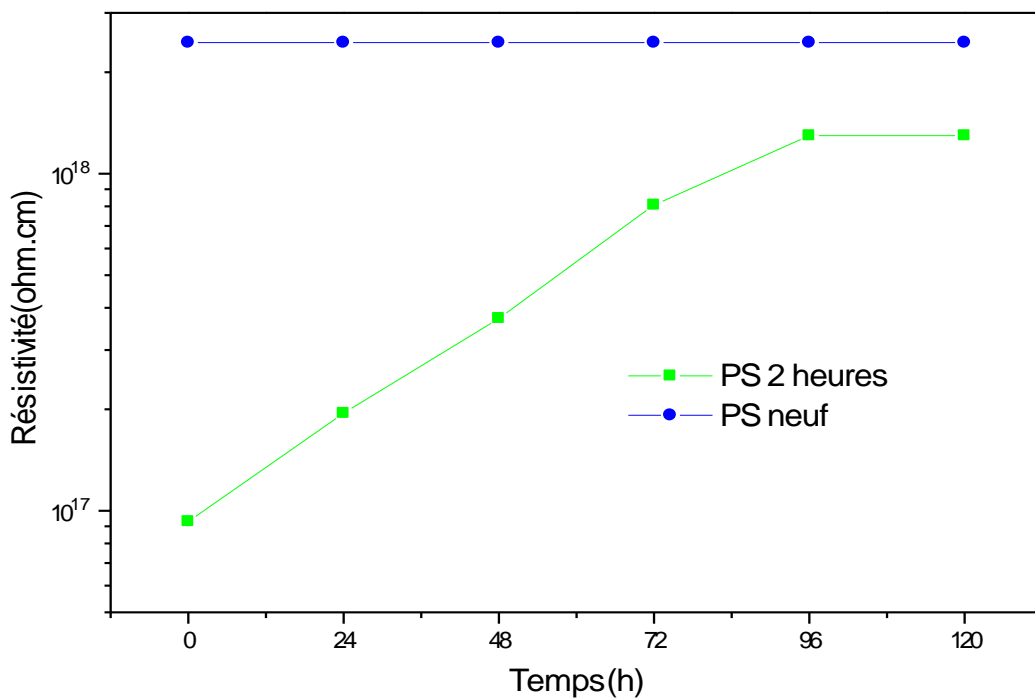


Figure IV. 40 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli durant 2 heures.

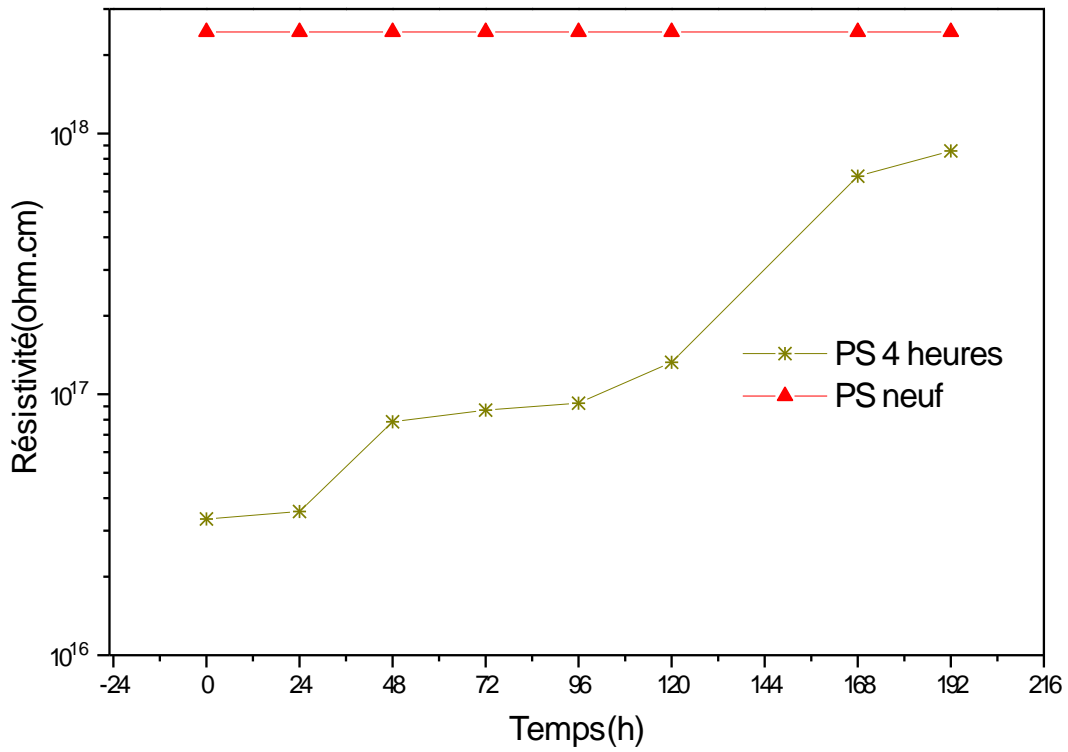


Figure IV. 41 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli durant 4 heures.

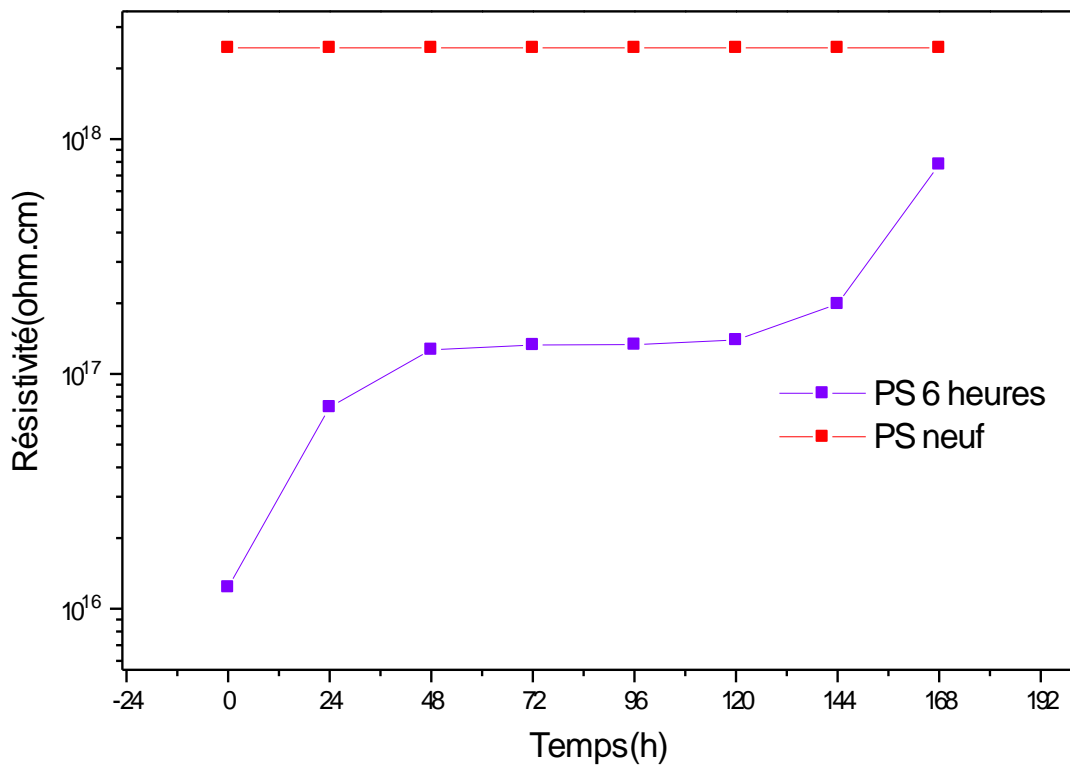
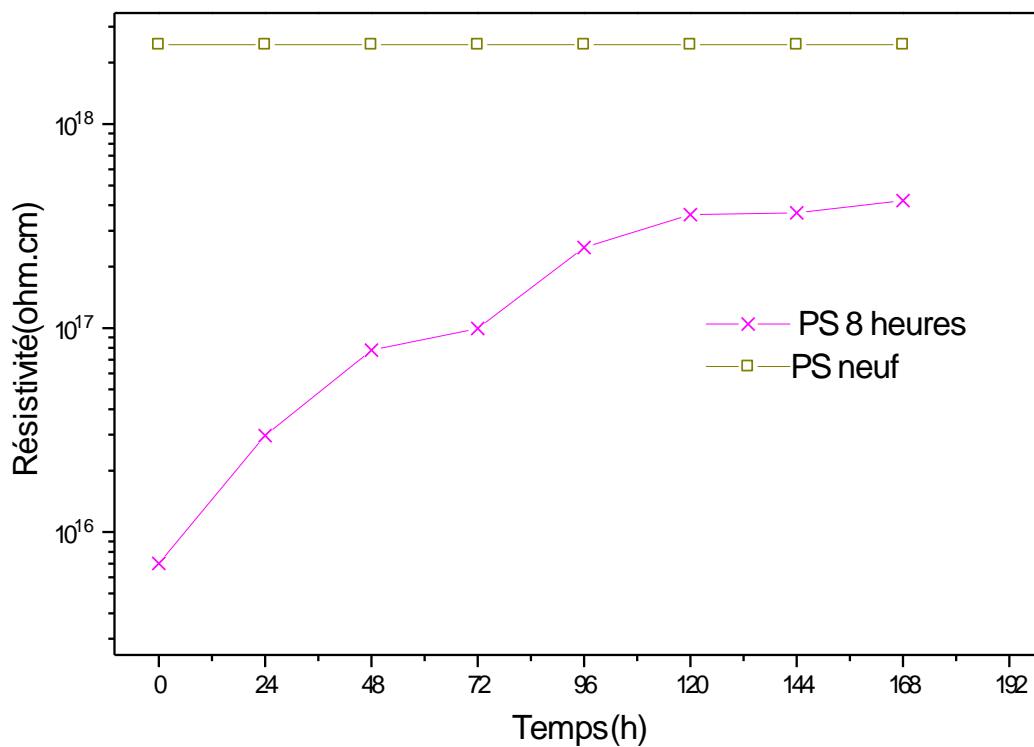


Figure IV. 42 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli durant 6 heures.



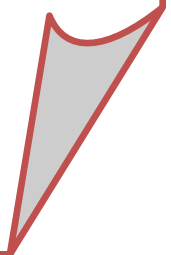
*Figure IV. 43 : Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli durant 8 heures.*

#### IV.5-Conclusion :

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que le vieillissement électrique augmente considérablement la conductivité électrique du PP et PS et que cette augmentation est d'autant plus importante que le temps de vieillissement est important. Ce qui est confirmé par la résistivité.

Le PP et PS reprend partiellement ses caractéristiques isolantes au bout de quelques jours de repos dans un environnement sec.

*CONCLUSION GÉNÉRALE.*



## Conclusion générale

Notre travail consiste en l'étude de l'influence du vieillissement électrique sur les polymères isolants. Après un rappel sur les polymères et la conduction électrique nous avons étudié la conduction électrique dans le PP et le PS sous champ faible en mesurant les courants de charge, de décharge et de la résistivité volumique. Les résultats expérimentaux obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Pour les deux polymères, les courants de charge chutent brusquement juste après l'application de la tension continue puis continuent de décroître lentement jusqu'à atteindre une valeur stable correspondant aux courants permanents (conduction). Ce courant stable est atteint aux environs de 900s après l'application de la tension.

- Les courants de décharge des deux polymères sont négatifs durant les premières dizaines de secondes puis changent de polarité au cours du temps. Le non réversibilité des courants de décharge et le passage vers les valeurs positives indiquent la présence d'une charge d'espace qui a une influence sur le processus de conduction.

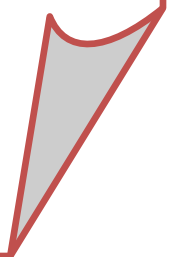
- L'influence du vieillissement électrique (obtenu en appliquant une tension de 10 kV aux échantillons pendant des durées allant jusqu'à 8 heures) sur les caractéristiques électriques de ces polymères est importante. En effet, le vieillissement augmente la conductivité des polymères et cette augmentation est d'autant plus grande que le temps de vieillissement est grand notamment au delà de 4 heures.

- L'influence du vieillissement électrique sur l'intensité des courants de décharges n'est pas significative. Par contre, en général, le vieillissement diminue le temps de passage vers les valeurs positives.

- Le PP et le PS reprennent partiellement leurs caractéristiques isolantes au bout de quelques jours de repos dans un environnement sec.

**Nous espérons que ce travail pourrait servir de support à des études futures sur d'autres types de vieillissement des polymères.**

# BIBLIOGRAPHIE.



## Bibliographie

- [1] **R. COELHO et B. ALADENIZ**, « Les diélectriques propriétés diélectriques des matériaux isolants », Edition HERMES ,1993.
- [2] **R. FOURNIE**, « Les isolants en électrotechnique, essais, mécanismes de dégradation et applications industrielles », Edition EYROLLES, 1990.
- [3] **G. MOUHEB et S. REKHOU**, « Influence du vieillissement thermique sur la conduction électrique du polypropylène et du polystyrène », Mémoire d'ingénieur UMMTO, 2007.
- [4] **D.LABBACI et N.SAIDOUN**, « Influence de vieillissement thermique cyclique sur les propriétés du PRC utilisé dans les câbles MT », Mémoire d'ingénieur UMMTO, 2002.
- [5] [www.sfc.fr/donnees/mater/Polystyrène](http://www.sfc.fr/donnees/mater/Polystyrène).
- [6] **P.ROBERT**, « Matériaux de l'électrotechnique », Edition Georgi 1979.
- [7] [www.info@goodfellow.com](mailto:www.info@goodfellow.com)
- [8] **C.STEVENS, AG. DAY ET B. FALLOU**, « Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants », CIGRE rapport N°3 groupe 15-05, 1982.
- [9] **K. LAKSHMINARAYANA, Y.DASARDHUDU et V.V.R.NARASIMHA**,  
« Charging and discharging current in poly Vinyl pyrrolidone polymer thin film », Edition Elsevier Science S-A, 1995.
- [10] **YVAN SEGUI**, « Diélectriques - Courants de conduction ». Techniques de l'Ingénieur, D2 301, 2000.
- [11] **N. DAHMANIE et A. GARIDI**, « Vieillissement climatique du PRC », Mémoire D.E.U.AUMMTO, 2006.
- [12] **C. MARC**, « Matériaux polymères », Edition DUNOD.
- [13] **O. LADJIMI, S. BAHLOUL et R. ALLEG**, « Caractérisation diélectrique du PRC vieilli thermiquement utilisé dans les câbles MT », Mémoire d'ingénieur UMMTO, 2001.
- [14] **Eugen. R. NEAGU et Rodica M. NEAGU**, « A new method for analysis of thermal discharging current », Conférence Publication, Elsevier Science S-A, 1999.
- [15] **J.Verdu**, « Vieillissement des plastiques », Edition EYROLLES.
- [16] **J.Verdu**, « Action de l'eau sur les plastiques», Technique de l'ingénieur, AM316, 2000.