

*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*

*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

*Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique*

*Département de l'électrotechnique*



# Mémoire

*De fin d'études*

*En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique*

*Option : Réseaux Electriques*

# Thème

*Étude de l'influence du vieillissement électrique sur la  
conduction électrique dans le Polystyrène (PS) et  
le Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)*

***Proposé et dirigé par :***

***Mr. M. MOUDOUD.***

***Etudié par :***

***Mr. A. HAMADI***

***Mr. D. REGHAL***

*Promotion 2010*

# *Remerciements*

*Nous souhaitons en tout premier lieu exprimer notre plus profonde reconnaissance à Mr. M. MOUDOUD, pour avoir assuré avec la plus grande attention le suivi de ce travail et pour sa légendaire disponibilité, nous le remercions pour toute l'aide qu'il nous a apportée afin de mener à bien ce travail.*

*Nous tenons également à remercier Mr. AKACHA pour sa disponibilité et la confiance qui nous a témoigné.*

*Nos remerciements vont aussi aux membres de jury, nous leur saurions grés d'avoir accordé une attention particulière au sujet en acceptant de faire partie de notre jury de soutenance.*

# *Sommaire*

# Sommaire

|                            |   |
|----------------------------|---|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
|----------------------------|---|

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES ISOLANTS SOLIDES

|                                                         |   |
|---------------------------------------------------------|---|
| I.1. Introduction.....                                  | 2 |
| I.2. Définition d'un isolant.....                       | 2 |
| I.3. Différents états des isolants.....                 | 2 |
| I.3.1. Isolants liquides.....                           | 2 |
| I.3.2. Isolants gazeux.....                             | 3 |
| I.3.3. Isolants solides.....                            | 3 |
| a. Isolants inorganiques.....                           | 3 |
| b. Isolants organiques.....                             | 3 |
| I.4. Les polymères synthétiques.....                    | 4 |
| I.4.1. Définition d'un polymère.....                    | 4 |
| I.4.1.1. La polymérisation.....                         | 4 |
| A. Définition.....                                      | 4 |
| B. La polymérisation en chaîne (polyaddition).....      | 4 |
| C. La polymérisation par étape (polycondensation) ..... | 5 |
| D. Les procédés de polymérisation.....                  | 5 |
| D.1. Polymérisation en masse.....                       | 5 |
| D.2. polymérisation en solution .....                   | 5 |
| D.3. polymérisation en émulsion.....                    | 5 |
| D.4. polymérisation en suspension.....                  | 5 |
| I.4.2. Les structures moléculaires des polymères.....   | 6 |
| I.4.3. Les grandes familles des polymères.....          | 7 |
| I.4.3.1. Les thermoplastiques.....                      | 7 |
| I.4.3.2.1. Les semi-cristallins.....                    | 7 |
| a. Le polyéthylène (PE).....                            | 7 |
| b. Le polypropylène (PP).....                           | 8 |
| I.4.3.2.2. Les amorphes.....                            | 8 |
| a. Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA).....          | 8 |
| b. Le polystyrène (PS) .....                            | 9 |
| I.4.3.2. Les thermodurcissables.....                    | 9 |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| I.4.3.3. Les élastomères.....                                  | 9  |
| I.4.4. Présentation de PS et du PMMA.....                      | 10 |
| I.4.4.1. Le polystyrène (PS) .....                             | 10 |
| I.4.4.1.1. Les propriétés du polystyrène.....                  | 10 |
| a. Les propriétés physiques.....                               | 10 |
| b. Les propriétés mécaniques.....                              | 10 |
| c. Les propriétés thermiques.....                              | 11 |
| d. Les propriétés électriques.....                             | 11 |
| I.4.4.1.2. Les avantages.....                                  | 11 |
| I.4.4.1.3. Les inconvénients.....                              | 11 |
| I.4.4.1.4. Domaines d'utilisation.....                         | 12 |
| I.4.4.2. Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA).....           | 12 |
| I.4.4.2.1. Les propriétés du poly méthacrylate de méthyle..... | 12 |
| a. Les propriétés physiques.....                               | 12 |
| b. Les propriétés mécaniques .....                             | 12 |
| c. Les propriétés thermiques .....                             | 12 |
| d. Les propriétés électriques.....                             | 13 |
| I.4.4.2.2. Les avantages.....                                  | 13 |
| I.4.4.2.3. Les inconvénients.....                              | 13 |
| I.4.4.2.4. Domaines d'utilisation.....                         | 13 |
| I.5. Conclusion.....                                           | 14 |

## **CHAPITRE II : CONDUCTION ELECTRIQUE DANS LES DIELECTRIQUES**

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Introduction.....                                                               | 15 |
| II.2. Généralités.....                                                                | 15 |
| II.2.1. Conduction et structure du matériau.....                                      | 15 |
| II.2.1.1. Rappel sur la théorie des bandes.....                                       | 15 |
| a. définition.....                                                                    | 15 |
| b. Les bandes d'énergies.....                                                         | 15 |
| c. niveau de fermi.....                                                               | 16 |
| d. variation de l'énergie de fermi avec la température.....                           | 17 |
| e. Mobilité de charges " $\mu$ ".....                                                 | 17 |
| f. polarisation des diélectriques.....                                                | 18 |
| II.2.1.2. Courant de conduction, de diffusion, de déplacement et de polarisation..... | 18 |
| II.2.1.3. Courants d'absorption et de résorption.....                                 | 20 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2.2. Mécanismes de conduction dans les isolants.....                         | 22 |
| II.2.2.1. Mécanisme limité par l'interface.....                                 | 22 |
| a. Effet thermoélectronique (ou effet Schottky).....                            | 23 |
| b. Effet Fowler-Nordeim.....                                                    | 24 |
| II.2.2.2. Le mécanisme de transport contrôlé par le volume de diélectrique..... | 25 |
| a. Effet Poole-Frenkel.....                                                     | 25 |
| b. Courant limité par charge d'espace.....                                      | 27 |
| c. Model de Hooping (conduction par saut).....                                  | 29 |
| II.3. Conclusion .....                                                          | 30 |

## **CHAPITRE III : VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS**

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| III.1. Introduction.....                                | 31 |
| III.2. Le vieillissement.....                           | 31 |
| III.2.1. Vieillissement chimique.....                   | 31 |
| A. Oxydation.....                                       | 31 |
| B. Dépolymérisation.....                                | 32 |
| C. Réticulation.....                                    | 32 |
| D. Vieillissement électrique.....                       | 32 |
| E. Vieillissement climatique.....                       | 33 |
| F. Vieillissement thermique.....                        | 33 |
| III.2.2. Vieillissement physique.....                   | 33 |
| A. Vieillissement physique avec transfert de masse..... | 34 |
| B. Vieillissement physique sans transfert de masse..... | 34 |
| III.3. Conclusion.....                                  | 34 |

## **CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1. Introduction.....                                                                | 35 |
| IV.2. Présentation des échantillons.....                                               | 35 |
| IV.3. Description des montages expérimentaux.....                                      | 35 |
| IV.3.1. Mesure de courant de charge et de décharge et de la résistivité volumique..... | 35 |
| IV.3.2. Vieillissement électrique des échantillons.....                                | 36 |
| IV.4. Présentation des résultats expérimentaux et leurs discussions.....               | 37 |
| IV.4.1. Etude de polystyrène (PS).....                                                 | 37 |
| IV.4.1.1. Etude de la conduction électrique.....                                       | 37 |
| A. Evolution temporelle de courant de charge.....                                      | 37 |

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| A.1. Courant de charge (0 à 1500 s).....                                   | 37        |
| A.2. Courant transitoire (absorption).....                                 | 38        |
| A.3. Courant de conduction.....                                            | 39        |
| B. Evolution temporelle de courant de décharge (ou de dépolarisation)..... | 40        |
| C. Comparaison de courant de charge et de décharge.....                    | 41        |
| D. Evolution temporelle de la résistivité volumique.....                   | 43        |
| E. Caractéristique courant-tension I(V).....                               | 43        |
| F. Influence de vieillissement électrique.....                             | 44        |
| F.1. Influence sur les courants de conduction.....                         | 44        |
| F.2. Influence sur la résistivité volumique.....                           | 46        |
| G. Influence du temps de repos.....                                        | 47        |
| G.1. Influence sur la conduction électrique.....                           | 47        |
| G.2. Influence sur la résistivité volumique.....                           | 50        |
| IV.4.2. Etude de poly méthacrylate de méthyle (PMMA).....                  | 53        |
| IV.4.2.1. Etude de la conduction électrique.....                           | 53        |
| A. Evolution temporelle de courant de charge.....                          | 53        |
| A.1. Courant de charge (0 à 1500 s).....                                   | 53        |
| A.2. Courant transitoire (absorption).....                                 | 53        |
| A.3. Courant de conduction.....                                            | 54        |
| B. Evolution temporelle de courant de décharge (ou de dépolarisation)..... | 55        |
| C. Comparaison de courant de charge et de décharge.....                    | 56        |
| D. Evolution temporelle de la résistivité volumique.....                   | 58        |
| E. Caractéristique courant-tension I(V).....                               | 58        |
| F. Influence de vieillissement électrique.....                             | 59        |
| F.1. Influence sur les courants de conduction.....                         | 59        |
| F.2. Influence sur la résistivité volumique.....                           | 61        |
| G. Influence du temps de repos.....                                        | 62        |
| G.1. Influence sur la conduction électrique.....                           | 62        |
| G.2. Influence sur la résistivité volumique.....                           | 65        |
| IV.4.2.2. Observation visuelle.....                                        | 67        |
| IV.5. Conclusion.....                                                      | 68        |
| <b>Conclusion générale.....</b>                                            | <b>69</b> |

*Introduction*

*Générale*



Le développement de l'industrie chimique, a permis la production d'une grande variété de polymères. Ces matériaux ont rapidement conquis le domaine de l'isolation électrique (isolation de condensateurs, transformateurs, lignes de transport d'énergie électrique,...etc.), grâce à leurs excellentes caractéristiques isolantes (faibles pertes diélectriques  $\tan \delta$  et une faible conductivité électrique  $\sigma$ ), de leur bonne tenue mécanique, bonne résistance aux attaques chimiques et leur faible prix de revient [1].

L'une des préoccupations importantes tout au long de l'élaboration des polymères réside dans l'estimation de leur durée de vie pendant l'utilisation (c'est-à-dire la probabilité qu'ils accomplissent une fonction requise, dans des conditions données pendant une durée déterminée). Les recherches consacrées à l'étude des propriétés électriques de ces matériaux, ont été souvent étudiées en fonction du champ électrique appliqué, de la température, de la pression...etc. [1, 2].

Le présent travail porte sur l'étude de l'influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique du polystyrène (PS) et du poly méthacrylate de méthyle (PMMA).

Nous allons repartir notre travail en quatre parties :

- La première partie est consacrée aux généralités sur les isolants solides et les différentes familles constituant les polymères.
- Dans la deuxième partie nous présenterons les différentes lois qui régissent les mécanismes de la conduction électrique dans les isolants solides.
- Dans la troisième partie on présentera les différents types du vieillissement (vieillissement électrique, vieillissement chimique,...etc.).
- Le dernier chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental, aux essais effectués ainsi qu'à la présentation des résultats obtenus et à leur discussion.

Enfin, l'étude est achevée par une conclusion générale sur le travail réalisé.

# *Chapitre 1*

*Généralité sur les isolants*

### ***1.1- Introduction***

La conception et le fonctionnement d'un équipement électrique dépend des matériaux disponibles. Ainsi, les propriétés des isolants jouent un rôle crucial dans la construction des appareils électriques.

Avant, l'isolation utilisée dans les machines électriques est souvent assurée par du coton ou du papier imprégné de vernis spécial. Aujourd'hui, on utilise de plus en plus des isolants synthétiques pour les machines de moyenne et grande puissance.

Les isolants utilisés pour la distribution de l'électricité sont des isolants souples (caoutchouc, papier et produits thermoplastiques). Ces isolants doivent être utilisés à des températures élevées afin de leur assurer une durée de vie très longue [1].

Dans ce présent chapitre, nous examinerons les propriétés des isolants solides.

### ***1.2- Définition d'un isolant***

Un isolant est une substance ou un corps dont la conductibilité est nulle ou, en pratique, très faible (résistivité très élevée), utilisé pour séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents [2].

### ***1.3- Différents états des isolants***

On peut regrouper les isolants selon leurs états en trois (3) catégories :

#### ***1.3.1- Isolants liquides***

Les isolants liquides sont souvent utilisés dans l'isolation des machines électriques, car en plus de l'isolation, ils jouent aussi le rôle de refroidissement.

L'huile minérale est l'un des isolants le plus utilisé dans les matériels électriques (transformateurs à grande puissance, les condensateurs,...). Mais ils sont inflammables à une température proche de 150 °C.

Certains isolants liquides synthétique (fabriqués à base d'hydrogène chloré) ou à base silicone (obtenus par les huiles organiques) contourne le problème d'inflammabilité, mais ils sont plus chers.

#### ***1.3.2- Isolants gazeux***

Les gaz constituent l'élément de base de l'isolation à haute tension des appareils électriques.

De tout temps, les bonnes qualités isolantes de l'air ont été utilisées aussi bien dans les applications de l'électricité statique que dans l'isolation des lignes aériennes, car l'air est gratuit et il a la particularité d'être "*auto régénérateur*".

Dans ces dernières décennies, la nécessité de diminuer sensiblement les dimensions des installations électriques pour des questions d'encombrement et de coût a conduit à l'utilisation des gaz sous pression. En effet, la rigidité des gaz telle que SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>... est très élevée. Ils sont très utilisés dans les disjoncteurs.

L'inconvénient de l'utilisation de ces gaz est la diminution de la rigidité par le rayonnement cosmique [2].

### ***I.3.3- Isolants solides***

Les isolants solides sont des éléments de base des isolations à haute tension. En plus de l'isolation électrique, les isolants solides assurent la rigidité mécanique des matériels électriques.

De tout temps, des produits naturels tels que le bois sec, le soufre, les résines naturelles, le caoutchouc, ...etc., ont été utilisées pour l'isolation. A partir du 18<sup>ème</sup> siècle on a recouru également à des isolants solides synthétiques tels que le verre, le papier, et de nos jours aux résines phénoliques (comme la bakélite), aux résines synthétiques (époxy, polyester, silicone, etc.), au polyéthylène, au polypropylène... etc., qui sont de la famille des polymères et les plus utilisés actuellement, car ils sont facile a fabriquer [2].

On peut regrouper les isolants solides selon leurs natures en deux catégories principales :

#### ***a) Les isolants inorganiques***

Les isolants inorganiques sont des corps qui sont dépourvus des minéraux (fer, calcium,...). On peut citer comme exemple ; les verres, les céramiques et les oxydes. Ils peuvent tolérer des températures dépassant parfois les 1000 °C [1].

#### ***b) Les isolants organiques***

Ils sont composés de longues chaîne moléculaires de carbone et d'hydrogène. Ils ne peuvent pas supporter des températures élevées sans se désagréger [1].

Ils se subdivisent entre matériaux *naturels* (caoutchouc, papier, laine,...) et *synthétiques* (élastomères, polymères) [3].

### ***1.4. Les polymères synthétiques***

La variété des polymères synthétiques découverts par STAUDINGER est impressionnante. Le nombre des matériaux polymères utilisés couramment de nos jours a été préparé pour la première fois par ce chercheur.

En l'an 2000, la production mondiale de plastiques synthétiques a été de cent quatre-vingt millions de tonnes (180 MT), elle était de l'ordre de cent cinquante millions de tonnes (150 MT) par an dans les années 1990-1995 [4].

Des investigations, menées par des chercheurs, ont abouti à des améliorations surprenantes de nombreuses propriétés, et les polymères ont maintenant pénétrés les secteurs les plus avancés de la technologie [5].

*Qu'appelle-t-on polymère?*

#### ***1.4.1. Définition d'un polymère***

C'est un système formé par un ensemble de *macromolécules*, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimensions, issues d'un assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives, appelés "unités monomères". Ou bien d'une réaction dite de « polymérisation » [6].

Les polymères fabriqués à partir d'un seul type de monomère sont désignés par *homopolymère* (exemples : polyéthylène, polystyrène). Dès qu'au moins deux types de monomère participent à la formation des macromolécules, on parlera de *copolymères* (exemple : styrène-acrylonitrile (SAN)).

##### ***1.4.1.1. La polymérisation***

###### ***a- Définition***

La polymérisation est un processus de transformation d'un monomère, ou d'un mélange de monomères, en polymère. Elle désigne une réaction chimique, fonction du temps et de la température, conduisant la résine à se solidifier de manière irréversible [6].

On distingue deux types de polymérisation :

- **La polymérisation en chaîne (polyaddition)**

La polyaddition correspond à une réaction en chaîne avec réunion de molécules simples (ou monomères). C'est l'exemple du polychlorure de vinyle (PVC) [6].

- **La polymérisation par étape (polycondensation)**

Il s'agit de processus réactionnels dans lesquels deux entités moléculaires, interagissent pour unir au moyen d'une liaison covalente [5].

**b- Les procédés de polymérisation**

La synthèse de polymérisation, dépend des caractéristiques du produit désiré, des applications envisagées et de considération financière selon ces différents procédés :

- **Polymérisation en masse**

Dans ce cas il n'y a ni solvant, ni diluant. Le monomère est directement polymérisé sous l'action de la chaleur, de radiations ou d'un amorceur [6].

La technique de polymérisation en masse est plus difficile à contrôler, mais la moins contaminante pour le polymère. Dans cette technique, l'initiateur est dissous dans le monomère, les gaz devraient être enlevés, surtout l'oxygène.

- **Polymérisation en solution**

La polymérisation en solution se fait en présence d'un solvant ou d'un diluant. Différentes configurations sont possibles, monomère et polymère peuvent être plus ou moins solubles dans le solvant. Il arrive que le polymère précipite à partir d'un certain degré de polymérisation, comme le PVC dans le benzène.

- **Polymérisation en émulsion**

Pour ce procédé, le milieu dispersant est aussi de l'eau. Le monomère est maintenu en émulsion grâce à un agent émulsifiant, qui est un savon ou un sulfonât d'acide gras. La taille des particules en émulsion est de l'ordre du  $\mu\text{m}$ .

- **Polymérisation en suspension**

Dans cette technique, on disperse le monomère sous forme de gouttelettes (0.1 à 0.5 mm) dans l'eau, tout en agitant et en utilisant des stabilisants de suspension comme le polyalcool vinylique  $(\text{CH}_2\text{CHOH})_n$ . Dans cette technique, comme pour la polymérisation en masse où l'initiateur est dissous dans le monomère, ici l'amorceur est soluble dans le monomère, mais pas dans l'eau [6].

### ***I.4.2. Les structures moléculaires des polymères***

La structure se rapporte à l'enchaînement des atomes, à celui des unités monomères, à la chaîne ou encore à l'ensemble de chaînes, donc la dénomination de chaque structure est nécessaire pour les spécifier.

Le produit résultant de la polymérisation directe du monomère est dit homopolymère, sa molécule ne comporte donc qu'un seul motif élémentaire, se schématisant de la façon suivante :

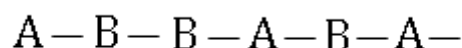


- Structure moléculaire d'un homopolymère.

Mais, on peut obtenir aussi, par polymérisation des copolymères, en utilisant plusieurs monomères de base, ou encore par griffage à partir d'un polymère sur lequel se branche d'autre chaîne polymériques [7].

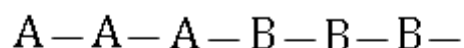
Schématiquement, on peut réaliser des copolymères à répartition de monomère :

- **Structure aléatoire** : (la plus courante)



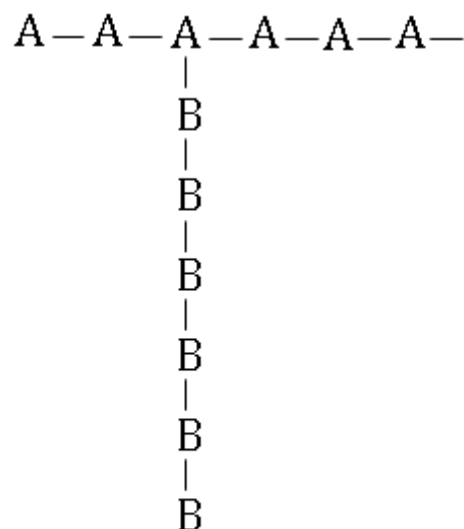
- Structure aléatoire d'un copolymère.

- **Structure séquencée (Alternance)**



- Structure séquencée d'un copolymère.

- **Structure greffée (ramification)**



- Structure greffée d'un copolymère.

### ***1.4.3. Les grandes familles des polymères***

Les polymères peuvent se regrouper en trois (3) familles :

#### ***1.4.3.1. Les thermoplastiques***

Les thermoplastiques sont des polymères susceptibles d'être, de manière répétée, ramolli par chauffage et durci par refroidissement. Ils sont de très loin les polymères les plus utilisés.

On peut les classer selon leur état:

##### ***1.4.3.1.1. Les semi-cristallins***

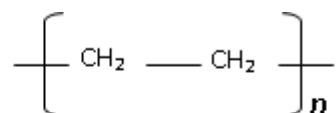
La structure cristalline n'est pas réservée au monde minéral. Elle est largement présente dans les polymères thermoplastiques, mais elle se révèle sous des aspects spécifiques aux polymères à cause de leurs longues molécules : les cristallites et les sphérolites [19].

On peut citer comme exemple :



**a/Le polyéthylène (PE)**

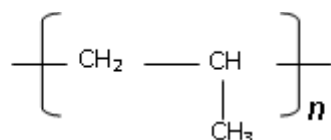
Il est issu de la polymérisation de l'éthylène ( $C_2H_4$ ). La molécule de polyéthylène se présente sous forme d'une chaîne d'atomes de carbone ( $C_6$ ) dont les valences libres sont occupées par des atomes d'hydrogène ( $H_1$ ) [8], comme le montre sa structure moléculaire ci-dessous :



- La molécule de polyéthylène en écriture condensée.

**b/Le polypropylène (PP)**

Il est issu de la polymérisation de propylène ( $C_3H_6$ ) par un catalyseur. Sa molécule est celle de l'éthylène, mais la molécule d'hydrogène est remplacée par le méthyle ( $CH_3$ ), sa structure moléculaire est représentée par la figure suivante :



- La molécule de polypropylène en écriture condensée.

***1.4.3.1.2. Les amorphes***

Amorphe signifie non cristallin ou sans structure de longue portée. Cette définition correspond aussi bien à la structure des polymères à l'état fondu (ou liquide), qu'à celle des polymères à l'état vitreux, qui peuvent être considérés comme des liquides figés. En l'absence de variations spatiales de l'indice de réfraction et de fortes absorptions de la lumière visible, on s'attend donc à ce que les polymères liquides ou vitreux soient transparents et incolores, conformément à l'expérience. Néanmoins, ces critères, qui sont déterminants pour de nombreuses applications, sont loin d'être remplis par tous les matériaux amorphes, qu'ils soient liquides (le mercure) ou vitreux (le charbon). De surcroît, la transparence n'implique pas forcément une structure amorphe (considérez un monocristal isolant, une pierre précieuse). En fait, les preuves expérimentales majeures pour l'absence de structure de longue portée dans les polymères

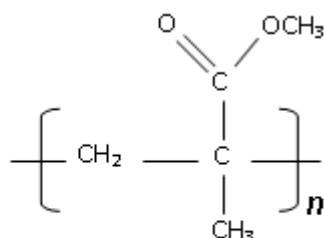
amorphes proviennent de différentes techniques de diffraction et de spectroscopie, même si ces méthodes ne sont pas encore en mesure de fournir des réponses définitives à la question de la structure locale (à l'échelle de quelques unités) [19, 20].

On peut citer comme exemple :

#### a/ Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA)

C'est un copolymère issu de polymérisation des monomères de méthacrylate et de méthyle. Le grand intérêt de PMMA est sa polymérisation facile après coulée de monomères et sa transparence.

Sa structure moléculaire est représentée sur la figure suivante :

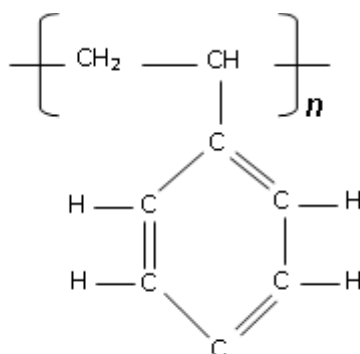


- La molécule de PMMA en écriture condensée.

#### b/ Le polystyrène (PS)

Le PS est un homopolymère issu de la polymérisation de monomère de styrène.

Sa structure moléculaire est la suivante :



- La molécule de PS en écriture condensée.

### ***1.4.3.2. Les thermodurcissables:***

Ils sont des polymères qui ne peuvent pas être mis en œuvre qu'une seule fois et qui devient infusible et insoluble après polymérisation. Une fois durci, leur forme ne peut plus être modifiée [6].

Ils existent différentes familles de thermodurcissables tels que [4] :

- Les polyépoxydes.
- Les polyuréthanes.
- Les polyimides.
- Les phénoplastes.

### ***1.4.3.3. Les élastomères***

Une matière plastique (plastique) désigne un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé et façonné, en général à chaud et à sous pression. Le mot « plastique » dérive de plasticité.

Les élastomères sont des matières plastiques qui peuvent être thermoplastes selon le polymère qui en est le constituant et dont l'élasticité est due à la structure de l'édifice macromoléculaire. Au vu de leurs qualités d'élasticité, ces matières sont difficilement usinables, par contre, elles sont fréquemment moulées.

On peut citer comme exemples :

- La silicone ;
- Polyuréthane.

● Il est difficile de classer les polymères selon leurs états, *amorphe*, *élastomère*, *semi-cristallin*, car les propriétés des polymères dépendent du temps et de la température. Par exemple, un élastomère à température ambiante peut devenir un amorphe ou un semi-cristallin à basse température...etc.

## ***1.4.4. Présentation du PS et du PMMA***

### ***1.4.4.1. Le polystyrène (PS)***

Le PS est un polymère amorphe, obtenu par polymérisation de la molécule de styrène (un composé organique aromatique de formule chimique  $C_8H_8$ ). Le styrène est un liquide à température et à pression ambiantes. Il est naturellement présent en faibles quantités dans certaines plantes, et est produit industriellement à partir du pétrole) [6].

Le PS se présente sous trois formes :

- le **polystyrène "cristal"**, ainsi appelé en raison de son aspect transparent
- le **polystyrène "choc"** caractérisé par l'ajout de plastifiants ou de **Caoutchouc** (butadiène)
- le **polystyrène expansé** (PSE) utilisé comme isolant thermique pour les bâtiments.

#### ***I.4.4.1.1. Les propriétés du polystyrène [8, 9]***

##### ***A. Propriétés physiques :***

- Masse volumique en  $[g/cm^3]$  : 1,04 - 1,05
- Indice de réfraction : 1,59
- Absorption d'eau sur 24h, 23 °C en [%] : < 0,4.

##### ***B. Propriétés mécaniques :***

- Contrainte au seuil (rupture) en [MPa] : 41 - 60
- Allongement au seuil (rupture) en [%] : 2 – 3
- Contrainte de flexion en [MPa] : 75 – 110
- Coefficient de Poisson : 0,35
- Résistance à la traction en [MPa] : 30 – 100.

##### ***C. Propriétés thermiques :***

- Température de transition vitreuse en [°C] : 90
- Conductibilité thermique en [W/m.K] : 0,17
- Chaleur spécifique en [J/K.Kg] : 1200
- Température maximale d'exploitation en [°C] : 50 – 99
- Température de fusion en [°C] : 150 – 170
- Sa dégradation commence dès 350 °C
- Solide à 20 °C et pâteux à 120 °C.

##### ***D. Propriétés électriques :***

- Résistivité superficielle  $[\Omega]$ :  $5.10^{16}$
- Constante diélectrique à 1 kHz : 2,4 - 3,1
- Facteur de pertes diélectriques 50 à 100 kHz :  $2.10^{-4}$
- Rigidité diélectrique en  $[kV.mm^{-1}]$  : 20
- Résistivité volumique en  $[\Omega.cm]$  :  $> 10^{16}$ .

***I.4.4.1.2. Les avantages :***

- Rigide
- Bonne stabilité
- Bon isolant
- Bel aspect de surface, possibilité de coloration
- Facilité extrême de mise en œuvre, cadences rapides
- Le PS résiste bien aux acides dilués, aux solutions salines et aux bases, se dissout et gonfle dans de nombreux milieux organiques.

***I.4.4.1.3. Les inconvénients :***

- Peu résistant aux chocs (cassant)
- Mauvaise résistance aux essences
- Combustible
- Mauvaise tenue thermique
- Electrostatique.

***I.4.4.1.4. Domaines d'utilisation :***

- Emballages
- Jouets, cassettes audio,... etc.
- Articles médicaux
- Pièces d'automobiles
- Isolation pour bâtiment (le PS expansé)
- Contre portes de réfrigérateurs et de congélateurs (le PS choc) [9]
- Condensateurs de puissance.

***I.4.4.2. Le poly méthacrylate de méthyle (PMMA)***

Le PMMA est un thermoplastique amorphe, issu de la polymérisation de monomère de méthacrylate de méthyle. Sa polymérisation peut se faire en trois voies [9] :

- Polymérisation en suspension
- Polymérisation en masse
- Polymérisation en solution.

### ***I.4.4.2.1. Les propriétés du PMMA***

Le PMMA possède de bonne propriété, qu'on peut classer comme suit [9, 11] :

#### ***A. Propriétés physiques :***

- Masse volumique en  $[\text{g}/\text{cm}^3]$  : 1,18
- Indice de réfraction : 1,491
- Absorption d'eau sur 24h, 23 °C en [%] : 0,3
- Aspect de la surface très lisse et brillant.

#### ***B. Propriétés mécaniques :***

- Contrainte au seuil (rupture) en [MPa] : 50 - 70
- Allongement au seuil (rupture) en [%] : 2 – 4
- Contrainte de flexion en [MPa] : 77 – 103
- Contrainte maximale à la compression en [MPa] : 97 – 117.

#### ***C. Propriétés thermiques :***

- Température de transition vitreuse en [°C] : 110 – 135
- Conductivité thermique en  $[\text{W}/\text{m.K}]$  : 0,19
- Température de fusion en [°C] : 190 – 240
- Température d'ébullition en [°C] : 200
- Dilatation thermique en  $[\text{K}^{-1}]$  :  $10^{-4}$ .

#### ***D. Propriétés électriques :***

- Rigidité diélectrique en  $[\text{MV}/\text{m}]$  : 19,7
- Résistivité volumique en  $[\Omega.\text{cm}]$  :  $>10^{15}$
- Constante diélectrique à 50 Hz : 3,7
- Facteur de pertes diélectriques : 0,03 – 0,06.

***I.4.4.2.2. Les avantages :***

-Le PMMA peut être fondu puis remoulé, mais c'est surtout par dépolymérisation qu'on peut le recycler facilement. Par chauffage, le PMMA redonne son monomère de départ (MMA), celui-ci peut alors être réutilisé pour une nouvelle polymérisation [6].

- Bonne résistance aux acides organique et minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées

- Excellente tenue aux rayons ultra-violets, à la corrosion

***I.4.4.2.3. Les inconvénients :***

- Fragile, cassant, rayable

- Brûle facilement.

***I.4.4.2.4. Domaines d'utilisation :***

- Plaques pour vitres

- Cadres téléphoniques

- Lentilles d'appareils photo

- meubles modernes

- Appareils de dessin (équerres)

- Hublots

- fibre optique.

***I.5. Conclusion***

Ce chapitre, est consacré entièrement aux généralités des polymères. Nous avons présenté les différentes familles des polymères (polymères synthétiques) et donné les différentes propriétés des deux matériaux (PS) et (PMMA) qui font l'objet de notre étude.

# *Chapitre II*

*Conduction électrique dans les  
diélectriques*



## ***II.1. Introduction***

Contrairement aux matériaux conducteurs, caractérisés à l'échelle microscopique par une très grande mobilité des électrons occupant les couches périphériques des atomes (leur résistivité est faible), les diélectriques possèdent une résistivité très grande ( $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$  jusqu'à  $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ ). En effet, l'opposition au passage d'un courant est très forte (leurs atomes retiennent énergiquement les électrons) [1, 2].

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux mouvements des électrons et aux différents mécanismes entraînant la conduction électrique.

## ***II.2. Généralités***

Dans cette partie, on traite le concept de conduction électrique dans les isolants solides en utilisant le cadre général de la physique des solides, et en particulier de la théorie des bandes d'énergies élaborées pour les matériaux cristallins. On tentera d'analyser le rôle joué par la structure moléculaire des polymères dans la conduction électrique.

### ***II.2.1. Conduction et structure du matériau***

#### ***II.2.1.1. Rappel sur la théorie des bandes***

##### ***a. Définition***

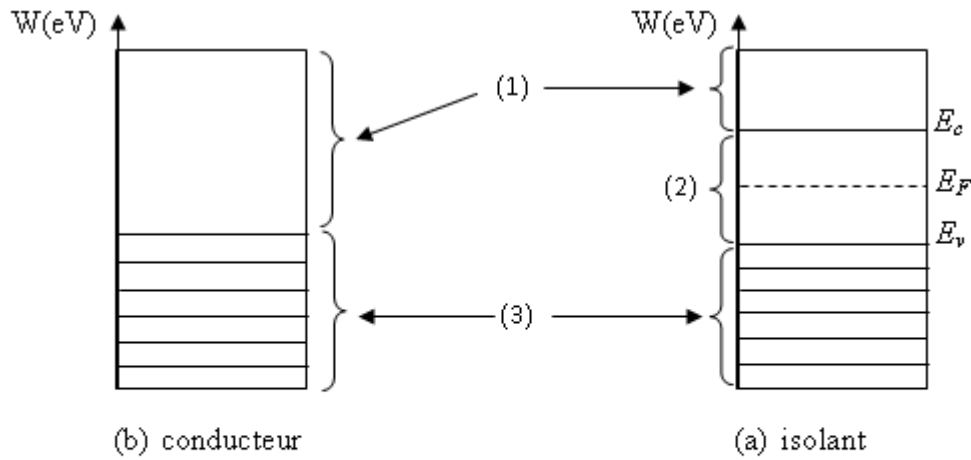
La théorie des bandes est un modèle quantique en physique des solides qui détermine des énergies possibles des électrons dans un solide et permet de comprendre la notion de la conductivité électrique.

Les théories de la conduction décrivent les phénomènes d'injection et de mouvements de porteurs sous l'action d'un champ électrique extérieur [11].

##### ***b. Les bandes d'énergie***

Dans un diélectrique, la bande de valence est occupée par des électrons et la bande de conduction est pratiquement vide, mais sous l'effet d'un champ électrique intense appliqué l'énergie ionique sera suffisante pour qu'un électron passe de la bande de valence à

la bande de conduction. Par contre, les bandes de valence et de conduction dans les conducteurs sont occupées [2, 11].



**Figure II.1** modèle des bandes d'énergie : (1) bande de conduction ;  
(2) bande interdite ; (3) bande de valence [2].

$E_F$  : niveau de Fermi des électrons dans le système.

$E_c$  : la borne supérieure de la bande interdite.

$E_v$  : la borne inférieure de la bande interdite.

Le niveau de Fermi est situé dans la bande permise (conduction) pour les conducteurs et dans la bande interdite ( $\Delta E = E_c - E_v = 6 \text{ à } 8 \text{ eV}$ ) pour les isolants.

### c. Niveau de Fermi

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 et de l'énergie, donc le nombre d'électrons susceptible de participer à la conduction est déterminé par la fonction de Fermi donnée par la formule (II.1) [6]:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{k_B \cdot T}\right]} \quad (\text{II.1})$$

Où :  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  : constante de Boltzmann ;

$T$  : température en  $[^{\circ}K]$ .

***d. Variation de l'énergie de fermi  $E_f$  avec la température***

Soit un diélectrique où il existe un puits de potentiel contenant des électrons. Le niveau de Fermi  $E_F$  correspondant à cet effet est donné par la formule (II.2).

$$E_F = E_{F0} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{k_B T}{E_{F0}} \right)^2 \right] \quad (\text{II.2})$$

Où :

$E_{F0}$  : Energie de Fermi à  $T=0\text{ K}$  ;

$T$  : Température en  $[K]$  ;

$k_B$  : Constante de Boltzmann.

Cette relation montre que la variation de niveau de Fermi  $E_F$  est faible pour des températures comprises entre  $0\text{ K}$  et  $293\text{ K}$  ( $E_F$  vaut  $5,8 \cdot 10^{-5}\text{ eV}$  comparée à  $3\text{ eV}$  pour un métal) [12].

***e. Mobilité des charges " $\mu$ "***

Dans un matériau (conducteur ou isolant), les électrons situés dans la bande de conduction (ou de valence) est considéré comme étant libre de se mouvoir dans le réseau et participe à la conduction, a ce moment correspond une mobilité " $\mu$ " donné par la formule (II.3) [13] :

$$\mu = \frac{e \cdot \tau}{m^*} \quad (\text{II.3})$$

Où:

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

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ C}$  : charge de l'électron ;

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

➤ Si le matériau comporte un certain nombre de pièges, les porteurs peuvent être immobilisés dans ces pièges (puits de potentiels), et ne passent qu'une petite partie de leur temps à l'état libre [10, 13].

### *f. Polarisation des diélectriques*

Le phénomène de polarisation est caractérisé par l'apparition d'une mince couche de charges négatives sur une face d'un matériau diélectrique et d'une mince couche de charges positives sur l'autre face sous l'application du champ électrique [14].

La polarisation  $\vec{P}$  et le champ électrique  $\vec{E}$ , sont liés par la formule (II.4) :

$$\vec{P} = (\epsilon - \epsilon_0) \vec{E} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  : La perméabilité absolue ;

$\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ A.s.V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  : La perméabilité du vide ;

$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$  : La perméabilité relative du matériau ou constante diélectrique;

$C$  : capacité du condensateur après introduction d'un diélectrique entre ces armatures en [C].

$C_0$  : capacité du condensateur à vide en [C].

#### *II.2.1.2. Courants de conduction, de diffusion, de déplacement et de polarisation*

Dans cette partie, nous étudierons le mouvement des porteurs traversant un isolant lorsque celui-ci est soumis à un champ électrique intense qui provoquera une circulation de courant de densité  $\mathbf{j}$  donnée par la formule générale (II.5) :

$$\mathbf{j}(t) = q \cdot n(x, t) \cdot \mu(E, t) \cdot \mathbf{E}(x, t) - q \cdot D_n \cdot \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

Où :

$q$  : la charge élémentaire ( $q=1,602.10^{-19}$ ) ;

$n(x,t)$  : densité de porteurs à l'abscisse  $x$ , à l'instant  $t$  ;

$\mu(E,t)$  : mobilité des porteurs ;

$E(x,t)$  : champ local à l'abscisse  $x$  et 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 leur mobilité par la relation d'Einstein ;

$D(x,t)$  vecteur d'induction électrique [11].

La formule (II.4) est composé de :

► **Courant de conduction [ $j_c(x,t)$ ]**

C'est un courant qui est dû au mouvement de charges sous l'action de champ électrique, qui est donné par :

$$j_c(x,t) = q.n(x,t).\mu(E,t).E(x,t) \quad (II.5.1)$$

► **Courant de diffusion [ $j_{dif}(x,t)$ ]**

C'est un courant qui est dû au mouvement de charges sous l'action de leur gradient de concentration " $D_n$ ".

$$j_{dif}(x,t) = q.D_n \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} \quad (II.5.2)$$

► **Courant de déplacement et de polarisation [ $j_d(t)$  et  $j_p(t)$ ]**

Ce sont des courants transitoires qui décroissent jusqu'à s'annuler avec le temps. Ces courants sont issus du troisième terme de la formule (II.5)  $\left( \frac{\partial D(x,t)}{\partial t} \right)$ .

$$\text{Avec : } D(x,t) = \epsilon_0.E(x,t) + P(x,t) \quad (II.5.3)$$

En dérivant l'équation (II.5.3) on aura :

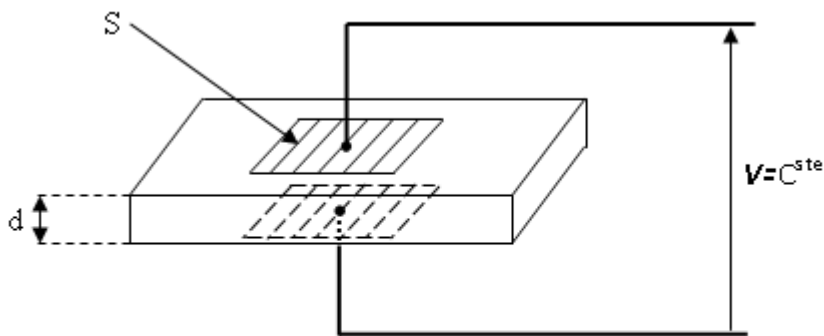
$$\frac{\partial D(x,t)}{\partial t} = \epsilon_0 \cdot \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = j_d(x,t) + j_p(x,t) \quad (\text{II.5.4})$$

Le courant de déplacement  $\left( \epsilon_0 \cdot \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \right)$  est lié à la variation de champ électrique.

Le courant de polarisation  $\left( \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} \right)$  est lié à la variation de la polarisation (moment dipolaire).

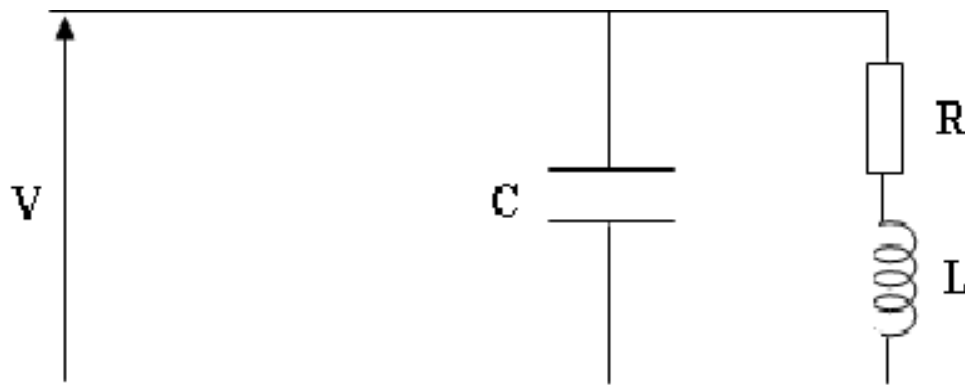
### II.2.1.3. Courant d'absorption et de résorption :

On soumet une plaque d'isolant solide d'épaisseur  $d$  placée entre deux électrodes de surface  $S$ , à un champ électrique  $E$  constant (figure II.2) :



**Figure II.2** : plaque isolante soumise à une tension constante  $V$ .

Le schéma électrique équivalent de la figure II.2 est donné comme suit :



**Schéma électrique équivalent.**

L'équation différentielle qui régit ce circuit est :

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

Avec :

$i_1$  : Le courant normal de charge qui circule dans le circuit en fonction du temps, si l'isolant est dépourvu de toute conductivité.

$L, R$  : inductance et résistance équivalentes du circuit.

$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{S}{d}$  : Capacité de condensateur constituée par le système électrode-isolant.

Le processus de charge fait apparaître un courant transitoire  $i_1$  et de conduction  $i_c$  (car, il n'existe pas un isolant dépourvu de toute conductivité).

On court-circuite les armatures du condensateur  $C$ , il n'y a plus de courant de conduction ( $i_c=0$ ) et le courant de décharge  $i_2$  doit suivre les mêmes lois que  $i_1$ .

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

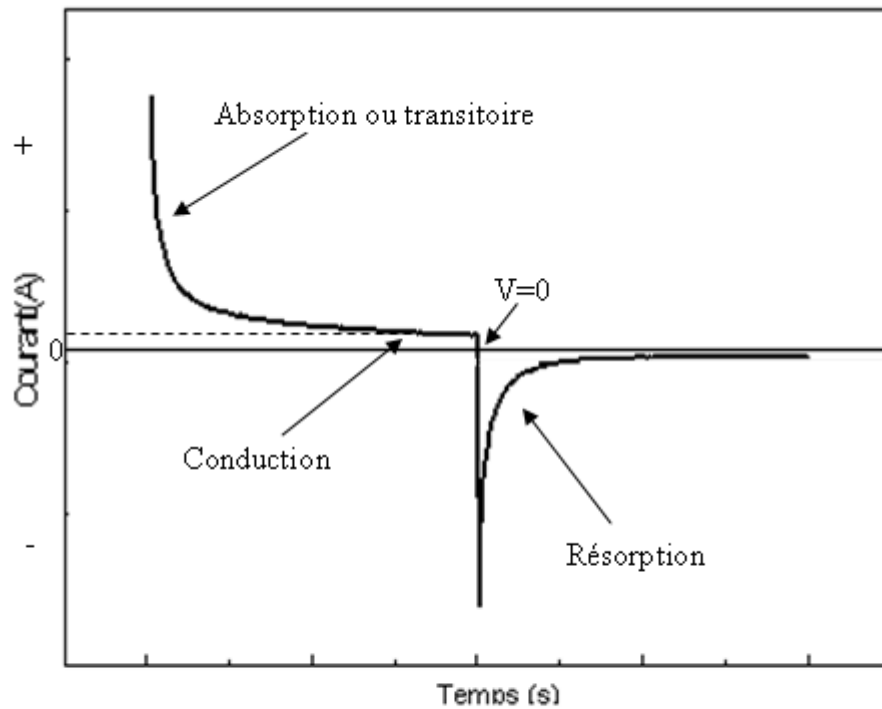
Si on soumet un isolant à des champs électriques faibles ne permettant pas l'injection de charges au niveau des électrodes, mais dans ces isolants, ils existent des charges résiduelles piégées qui provoquera la circulation des courants anormaux, qui sont désignés par  $i_1$  pour la charge (courant d'absorption) et  $i_2$  pour la décharge (courant de résorption) [14].

Les courants totaux de charge et de décharge sont :

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

$$I_2 = i_2 + i_2' \quad (\text{II.9})$$

Les courants d'absorption, de conduction et de résorption sont représentés par la figure II.3 :



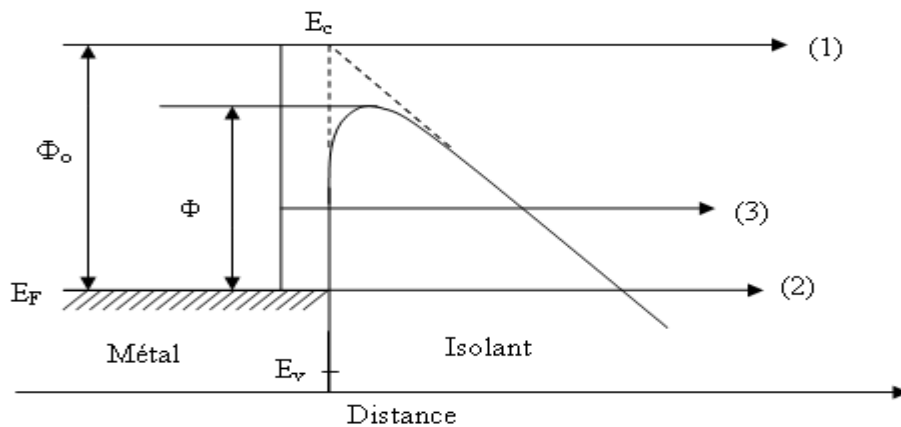
**Figure II.3 :** Variation des courants d'absorption, de conduction et de résorption en fonction du temps [14].

### II.2.2. Mécanismes de conduction dans les isolants

Lorsque les polymères sont soumis à un champ électrique constant, les mécanismes de conduction en régime stabilisé sont régis par différentes lois.

#### II.2.2.1. Courant limité par l'interface

La figure II.4 représente le schéma de bande à l'interface électrode-isolant :



**Figure II.4 :** Diagramme de bande à l'interface électrode métallique diélectrique [11]



Avec :

$E_F$  : le niveau de Fermi du métal d'électrode ;

$E_v$  : le niveau supérieur de la bande de valence ;

$E_c$  : le niveau inférieur de la bande de conduction ;

$\Phi$  : la hauteur de barrière que doit franchir un porteur issu de l'électrode métallique ;

$\Phi_0 = E_c - E_v$  : la hauteur de barrière en l'absence de champ électrique

Au dessous de niveau de Fermi on trouve des électrons, et ceux qui sont situés au niveau  $E_F$ , a trois possibilités pour pénétrer dans le diélectrique où il doit arriver jusqu'à la bande de conduction pour participer au transport :

- **Voie (1)** : passage par dessus la barrière ; elle est appelée effet thermoélectronique (effet Schottky) ;
- **Voie (2)** : passage à travers la barrière à énergie constante ;
- **Voie (3)** : passage à travers la barrière après gain d'énergie (ex. : énergie thermique  $kT$ ).

Les voies (2) et (3) sont appelées effet Fowler-Nordheim.

### A. Effet thermoélectronique (ou effet Schottky)

Il concerne les porteurs qui, ayant acquis assez d'énergie sous l'action combinée de champ électrique, la température et la force image (charge image), peuvent passer au dessus de la barrière de potentiel interfaciale. En conséquence, l'électron subit une *force électrostatique* " $F(x)$ " (comme dans le cas de deux charges opposées) [6, 11].

$$F(x) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{4x^2} \quad (\text{II.10})$$

Donc, pour déplacer un électron, on doit fournir une énergie  $W_{\text{Schottky}}$  telle que :

$$W_{\text{Schottky}} = - \int F(x) dx = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{4x} \quad (\text{II.11})$$

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

$$\phi = \phi_0 - \beta_s E^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.12})$$

Où :

$$\beta_s = \left( \frac{e^3}{4\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^2 \quad \text{La constante de Schottky ;}$$

E : Le champ électrique appliqué.

La densité de courant est donnée par la formule suivante :

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right) \quad (\text{II.13})$$

Où :

$$A = \frac{4\pi m k^2}{h^3} = 120 \text{ A/cm}^2 : \text{Constante de Richardson-Schottky ;}$$

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

T : température en [K] ;

m : masse de l'électron ;

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} : \text{Constante de Planck.}$$

## B. Effet Fowler-Nordheim

Il concerne les électrons qui de part leur nature ondulatoire, peuvent être transmis par *l'effet tunnel*, qui désigne la propriété que possède un porteur de franchir une *barrière de*

*potentiel* sous l'action d'un champ électrique élevé (de l'ordre de  $10^8$  à  $10^{10}$  V/m) et des températures de 300°K [11, 14].

La densité de courant pour ce mécanisme est donnée par la formule (II.14) :

$$J = BE^2 \exp\left(-\frac{C}{E}\right) \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec : } B = \frac{e^3}{8\pi h \phi_0} ;$$

$$C = 4(2m)^{1/2} \phi_0^{3/2} .$$

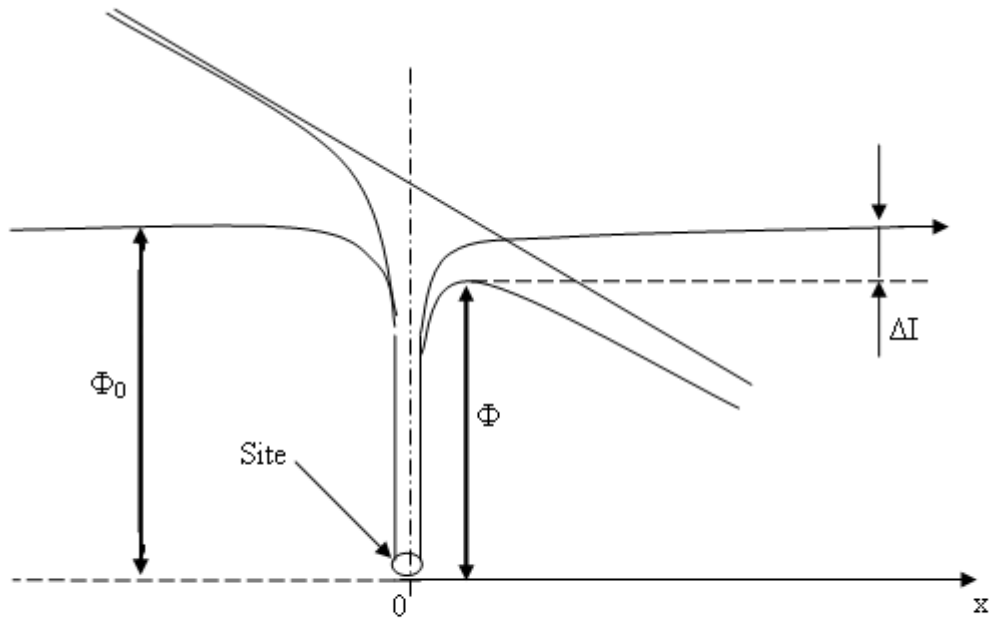
D'après la formule (II.14), on peut dire qu'avec des valeurs élevées de champ électrique appliqué, on aura des valeurs très élevées de la densité de courant, donc tous les électrons sont susceptibles de quitter le métal par effet tunnel.

Par contre, dans l'effet Schottky seuls les électrons ayant une énergie supérieure ou égale à l'énergie de Fermi ont la possibilité de quitter le métal.

#### II.2.2.2. Mécanismes de transport contrôlés par le volume de diélectrique

##### A. Effet Poole-Frenkel

Cet effet est analogue à celui de Schottky, mais il résulte de l'émission d'un porteur de charge d'un piège à la bande de conduction ou à un autre site voisin (si celui-ci est suffisamment rapproché) [13].



**Figure II.5.** L'effet Poole-Frenkel. Le champ appliqué abaisse l'énergie d'ionisation.

Donc l'effet Poole-Frenkel résulte de l'abaissement de la barrière  $\Delta\Phi$ , sous l'effet du potentiel coulombien et du potentiel associé au champ appliqué  $E$ .

Le nombre de porteurs susceptibles de passer dans la bande de conduction est [10, 13] :

$$n = n_0 \exp\left[-\frac{1}{kT}(\phi_0 - \Delta\phi)\right] \quad (\text{II.15})$$

Avec:  $\Delta\phi = \beta_{PF} E^{1/2}$

$$\beta_{PF} = \left(\frac{e^3}{\pi\epsilon}\right)^{1/2} = 2\beta_s : \text{Constante de Poole-Frenkel.}$$

Le facteur 2 résulte du fait que le champ d'interaction entre le porteur et son image dans l'effet Schottky est quatre (4) fois plus faible que celui qui est dû à l'interaction entre le porteur et le piège dans l'effet Poole-Frenkel [13].

L'expression de la densité de courant s'écrit :

$$j = j_0 \exp \left[ - \frac{(\phi_0 - \beta_{PF} E^{1/2})}{kT} \right] \quad (II.16)$$

Avec :  $j_0 = e \mu n_0 E$

### B. Courant limité par charge d'espace

Le diélectrique peut contenir des porteurs de charge dus à des impuretés ou issu de dissociation ionique sous l'action d'un champ électrique E (imposé par le champ appliqué et le champ induit par les charges piégées) qui provoquera le déplacement des porteurs à la vitesse "v" selon la formule (II.14) [11 - 13] :

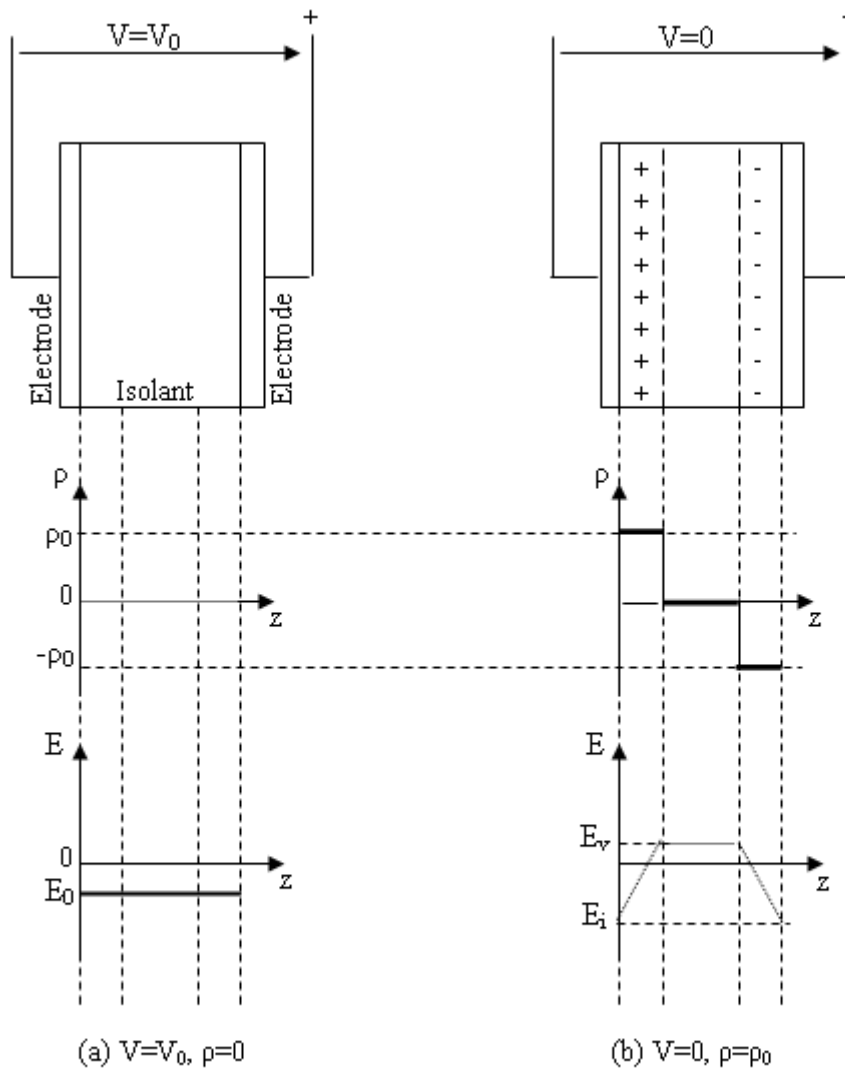
$$v = \mu E \quad (II.17)$$

Où :

v : La vitesse des porteurs ;

$\mu$  : La mobilité des porteurs.

➤ La figure II.6 décrit une situation où l'on considère un isolant d'épaisseur d et ses électrodes en supposant le problème unidimensionnel selon la direction z [3].



**Figure II.6.** Charge d'espace et champ électrique [3].

En l'absence de charge  $\rho(z)$  et pour un potentiel appliqué  $V_0$ , on aura dans l'isolant un champ constant de valeur  $E_0=V_0/d$  (fig. II.6.a).

Si on court-circuite les deux électrodes ( $V_0=0$ ) (fig. II.6.b), il y aura apparition de deux zones de charge d'espace adjacentes aux électrodes, de même épaisseur, de signes opposés et d'égale densité de charge  $\rho_0$ , alors le champ propre de charge d'espace est donné par la résolution de l'équation de poisson suivante [3] :

$$\text{div}E(z) = \frac{\rho(z)}{\epsilon} \quad (\text{II.18})$$

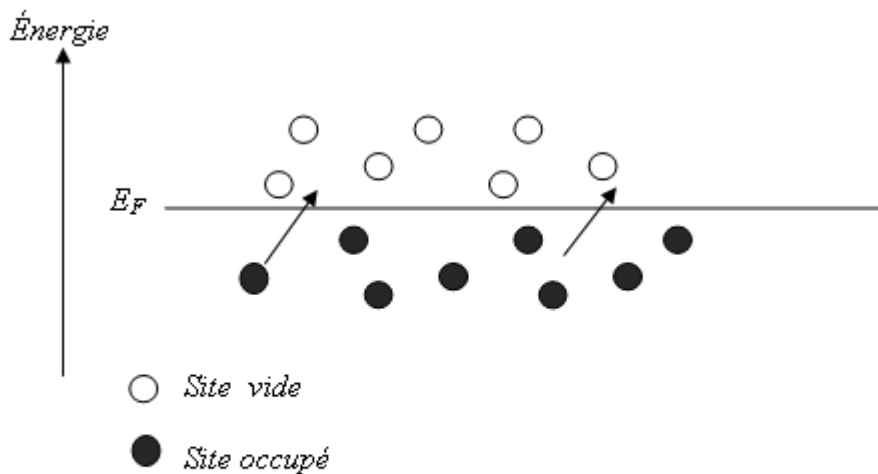
Avec  $\epsilon$  : Permittivité du milieu.

D'après la quantité  $\int_0^d E(z)dz$  qui est égale au potentiel nul ( $V=0$ ), on peut dire que l'aire sous la courbe de distribution du champ électrique est nulle. Appelons  $E_v$  la valeur du champ dans la zone où la densité de charge est nulle ( $\rho(z)=0$ ) et  $E_i$  la valeur du champ aux interfaces en  $z=0$  et  $z=d$  [3].

### C. Model de Hopping (conduction par saut)

Le mécanisme de conduction dans les diélectriques se produit entre états localisés en énergie, sous l'action des champs faibles.

Le niveau de Fermi, sépare les niveaux occupés des niveaux vides, qui sont représentés sur la figure II.7.



**Figure II.7.** Sauts de site à site dans un mécanisme de Hopping [11].

Lorsque les sites sont spatialement ou énergétiquement proches, les porteurs peuvent se déplacer d'un site donneur à un site accepteur par un saut [11].

En se basant sur les distances énergétique et spatiale, Mott a montré que la conductivité par saut entre les deux sites s'écrit :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left[-\left(AT^{-1/4}\right)\right] \quad (\text{II.19})$$

Avec :

A : Constante dépendant de la densité et de la nature des pièges.

### ***II.3. Conclusion***

Au cours de ce chapitre, nous avons présentés les différentes lois qui régissent les mécanismes de conduction dans les polymères en régime permanent, lorsque le matériau est soumis à un champ électrique constant.



# *Chapitre III*

*Vieillissement des isolants*

### ***III.1. Introduction***

Les isolants utilisés en haute tension subissent plusieurs facteurs, électrique (champ électrique) ou climatique (température, humidité...) ou chimique (radiation...) pouvant influencer négativement sur leurs caractéristiques isolantes.

L'emploi des matériaux polymères peut être sévèrement limité par une perte prématurée de leurs propriétés au cours de leur usage [17].

### ***III.2. Le vieillissement***

On appelle vieillissement tout phénomène d'évolution lente et irréversible de la structure et de la composition d'un matériau sous l'effet de son instabilité propre, mettant en jeu son bon fonctionnement. Ces changements des caractéristiques sont tels qu'ils soumettent l'isolation à un risque de rupture prématuré dans le temps [15, 17].

On distingue deux types du vieillissement :

#### ***III.2.1. Vieillissement chimique***

Ils provoquent une modification du matériau sous l'influence de l'environnement (modification de la structure chimique des macromolécules). Dans la pratique, il se superpose à un vieillissement physique. Les isolations peuvent être soumises à différents types de vieillissement chimique [12].

Des réactions électrochimiques peuvent également conduire à une dégradation des propriétés du matériau. Dans certaines circonstances il apparaît des arborescences électrochimiques.

Et parmi les phénomènes qui provoquent le vieillissement chimique on trouve :

### ***A. Oxydation***

La cause principale, est l'oxygène qui s'attaque à la chaîne hydrocarbonée des polymères, en entraînant des réifications parasites. Ce processus est lent, et a pour conséquence la formation de produits acides qui augmente la conductivité [16].

La dégradation des isolants par oxydation peut réduire rapidement leur durée de vie. Pour limiter la détérioration qui accompagne la réaction d'oxydation on fait appel aux anti-oxydants qui réagissent avec l'oxydant et empêchent par suite la propagation de l'oxydation.

### ***B. Dépolymérisation***

C'est la réaction inverse de la polymérisation, un cas particulier de la réaction de coupure de chaînes. Elle crée un site déstabilise la liaison monomère-monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules de monomères [12].

### ***C. 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.

### ***D. Vieillissement 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.

***E. Vieillissement climatique***

La durée de vie de service de la plupart des isolants est liée au vieillissement naturel, comme résultat du rayonnement solaire, l'humidité relative ambiante et les éléments chimiques existant dans l'air.

Il est évident que le vieillissement naturel d'un matériau est difficile à prévoir, il dépend de :

- La zone climatique ;
- L'environnement ;
- Contraintes qui lui sont appliquées.

***F. Vieillissement thermique***

Le vieillissement thermique est l'effet de la température sur les isolants solides.

Il a été constaté en 1930 par Montsinger qui a présenté une formule empirique décrivant la réduction de la durée de vie par un accroissement de 8°C de la température de papier utilisé comme isolant dans les transformateurs.

L'effet de la température peut avoir plusieurs conséquences sur les polymères, elle permet la modification de la structure des matériaux, un rétrécissement et un changement de la couleur ainsi qu'une perte de masse [15].

***III.2.2. Vieillissement physique***

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

***A. Vieillissement 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 due 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'isolation.

***B. Vieillissement 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.

***III.3. Conclusion***

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents types du vieillissement qui peut influencer sur les propriétés des isolants solides.

# *Chapitre IV*

*Etude expérimentale*

### IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des montages expérimentaux utilisés, à la présentation des résultats et leurs discussions. L'expérimentation consiste en l'étude de l'influence de vieillissement électrique sur la conductivité électrique du PMMA et du PS.

### IV.2. Présentation des échantillons

Les essais ont été effectués sur des échantillons du PS et du PMMA, ayant une forme circulaire de diamètre  $D=85mm$  et une épaisseur de  $0,5mm$ .

Afin de minimiser les charges résiduelles, les échantillons sont bien nettoyés et court-circuités à travers l'électromètre durant 1000s avant la mesure des courants de charge.

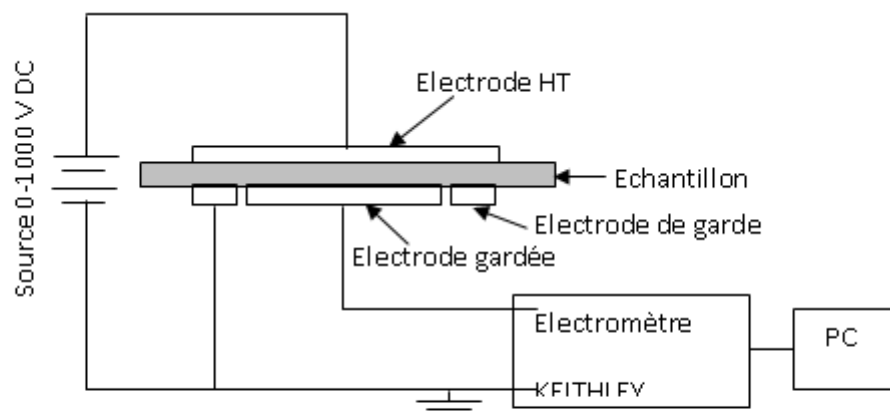
### IV.3. Description des montages expérimentaux

#### IV.3.1. Mesure des courants de charge et de décharge ainsi que la résistivité volumique

La figure IV.1 représente le schéma du dispositif expérimental que nous avons utilisé pour mesurer les courants de charge et de décharge ainsi que la résistivité volumique.

Celui-ci est constitué de :

- ▶ une source de tension continue réglable de 0 à 1000V ;
- ▶ un électromètre KEITHLEY 6517 ;
- ▶ une enceinte KEITHLEY 8009 (enceinte métallique doté de deux électrodes planes) ;
- ▶ un micro-ordinateur pour la commande et l'acquisition des données.



**Figure IV.1 :** Montage de mesure des courants de charge et de décharge ainsi que la résistivité volumique.

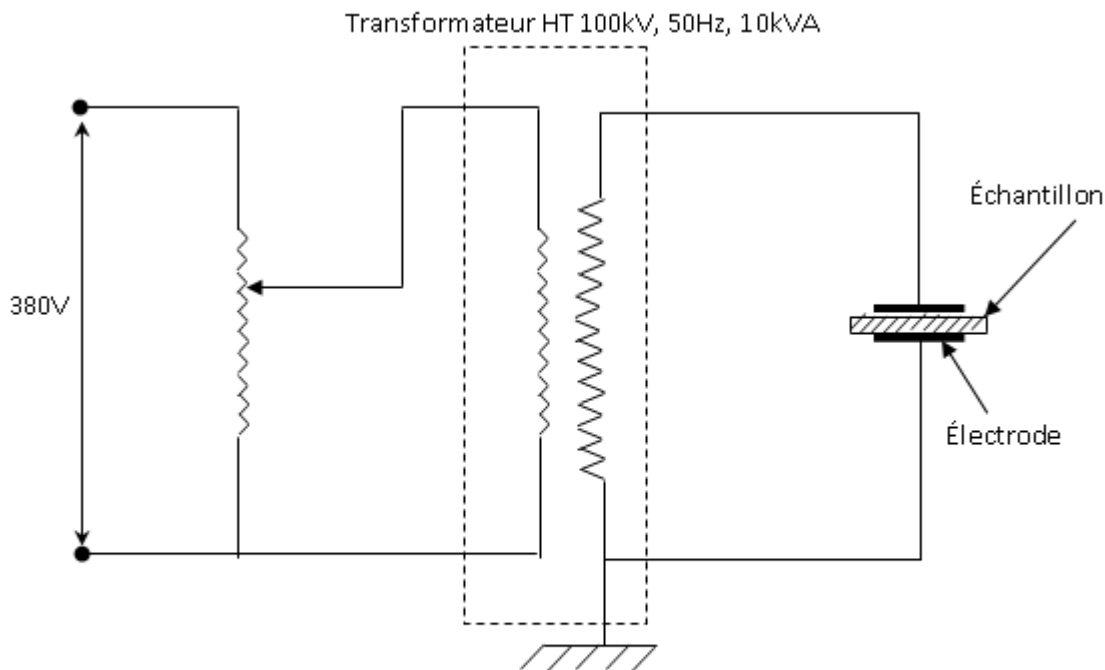
Le courant de charge est mesuré en appliquant une tension continue de 1000V durant une période de 1500s. Le courant de décharge est obtenu en court-circuitant l'échantillon à travers l'électromètre pour la même période. La résistivité volumique est mesurée en appliquant un signal carré de 1000V d'amplitude et de 60s par demi-cycle.

#### IV.3.2. Vieillessement électrique des échantillons

Le dispositif utilisé pour vieillir les échantillons est représenté sur la figure IV.2. Il est constitué :

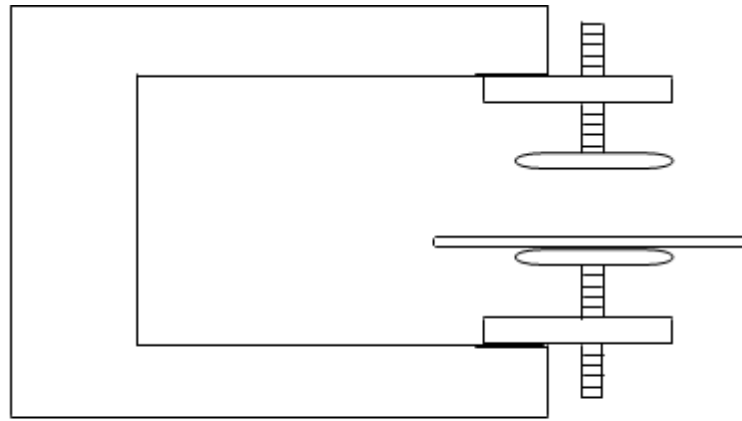
- d'une source de tension de 380V ;
- d'un transformateur H.T (100kV, 50Hz, 10kVA) ;
- de deux électrodes planes portées par un support en bakélite (figure IV.3) conçu de manière à ce qu'elles soient parfaitement opposées et perpendiculaires par rapport au plan. L'électrode supérieure est reliée à la haute tension et l'électrode inférieure est reliée à la terre.

Pour vieillir électriquement les échantillons, on applique une tension alternative de  $10\text{kV}_{\text{eff}}$  pendant des durées différentes (1h, 2h, 4h, 6h et 8h).



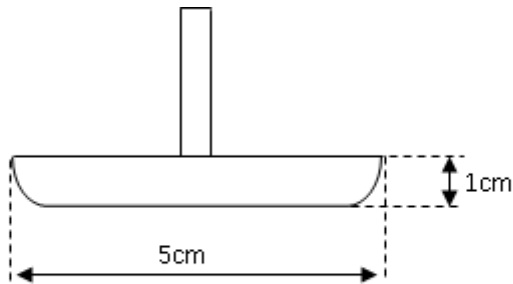
**Figure IV.2.** Montage expérimental permettant d'avoir le vieillissement.





**Figure IV.3.** Support des électrodes.

- Les dimensions de l'électrode sont représentées sur la figure IV.4 :



**Figure IV.4.** Dimensions de l'électrode.

## ***IV.4. Présentation des résultats expérimentaux et leurs discussions***

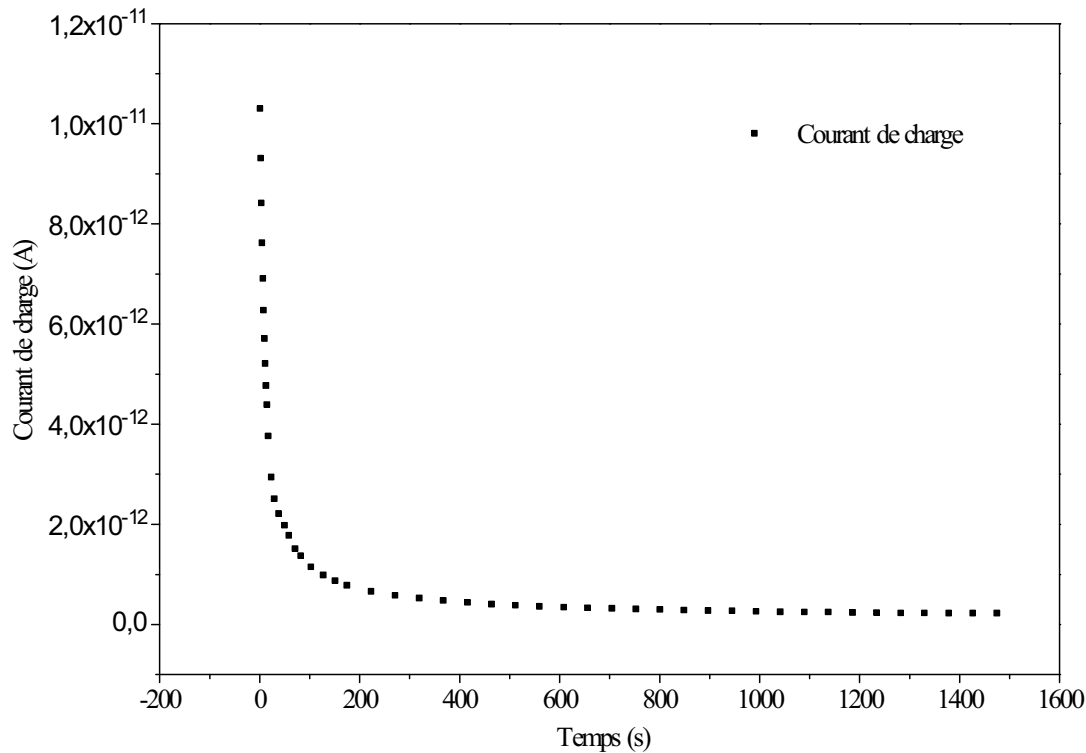
### ***IV.4.1. Etude du polystyrène (PS)***

#### ***IV.4.1.1. Etude de la conduction électrique***

##### ***A. Evolution temporelle du courant de charge***

##### ***A.1) Courant de charge ou de polarisation (0 à 1500 s)***

L'évolution temporelle du courant de charge du PS vierge est représentée sur la figure IV.5 :



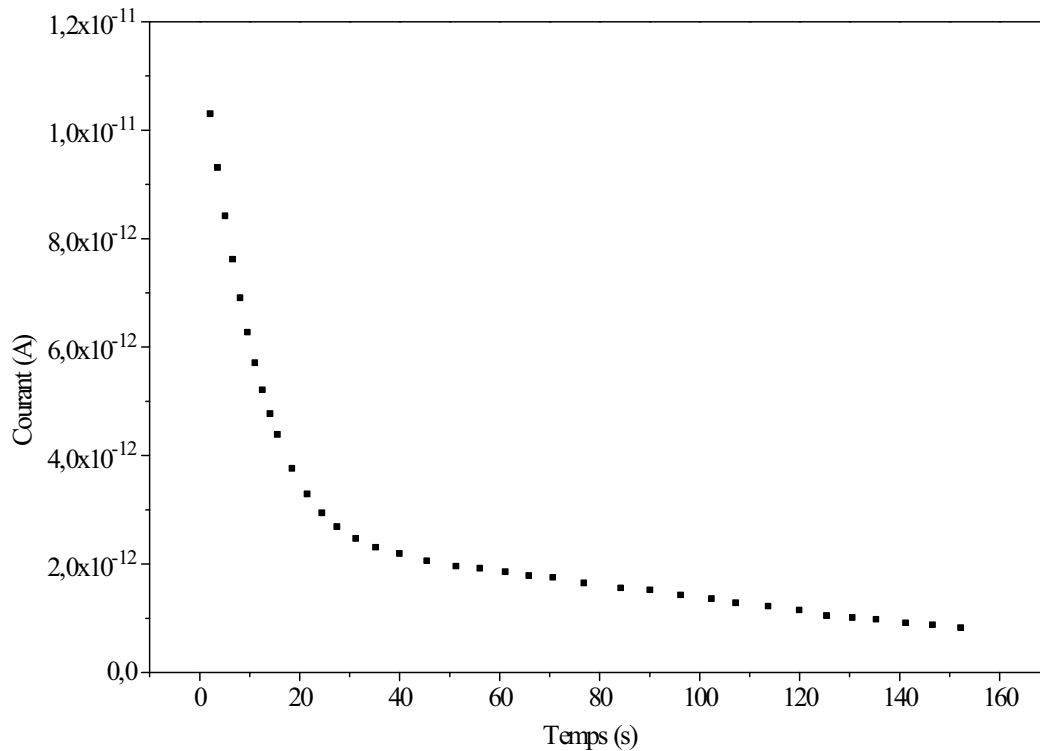
**Fig. IV.5** Variation temporelle du courant de charge du PS vierge.

On constate que le courant de charge chute très rapidement durant les premières dizaines de secondes puis continue à décroître lentement (légère variation) à partir de 150s jusqu'à atteindre la stabilité aux environs de 1200s.

Ce courant de charge comprend le courant transitoire (absorption) et le courant stable (conduction). Afin de déterminer approximativement la frontière entre les deux types on zoome la plage de 0 à 150s et de 150 à 1500s.

#### **A.2. Courant transitoire (absorption)**

L'évolution temporelle du courant transitoire est représentée sur la figure IV.6 :

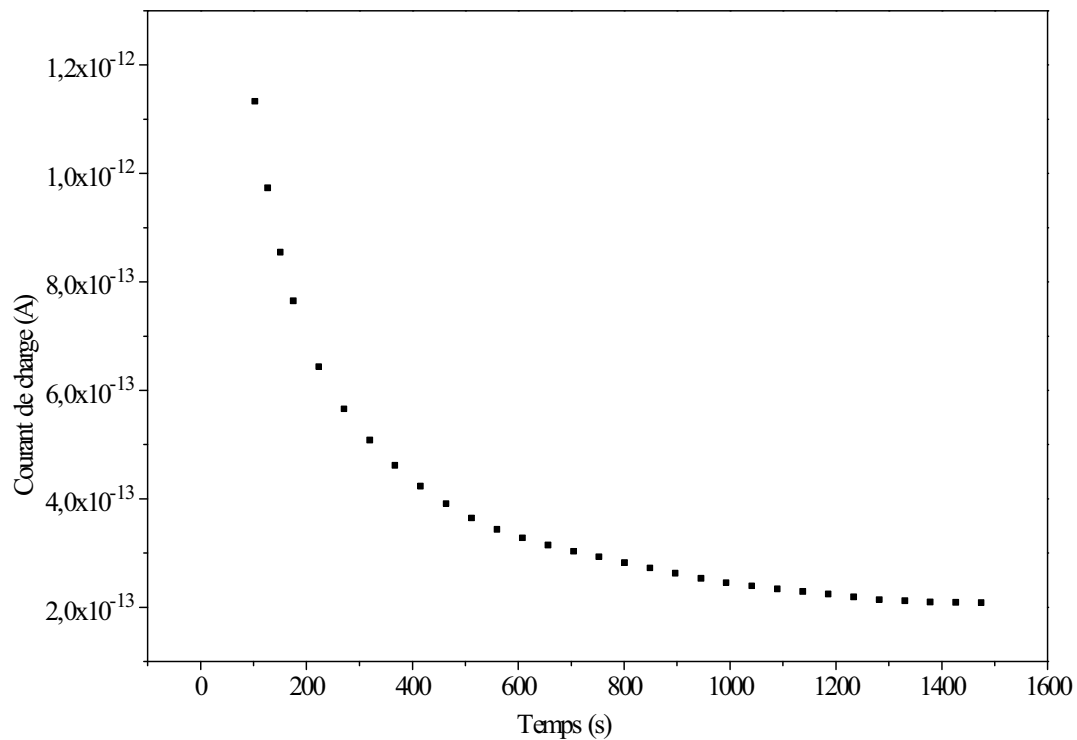


**Fig. IV.6** Variation temporelle du courant transitoire du PS vierge.

On remarque une chute brusque juste après l'application de la tension continue (0 à 40s) et continue à décroître lentement au-delà de 40s.

### **A.3. Courant de conduction**

On zoome la partie 150 à 1500s pour estimer la frontière entre le courant transitoire et le courant de conduction. La figure IV.7 représente la variation du courant en fonction du temps.

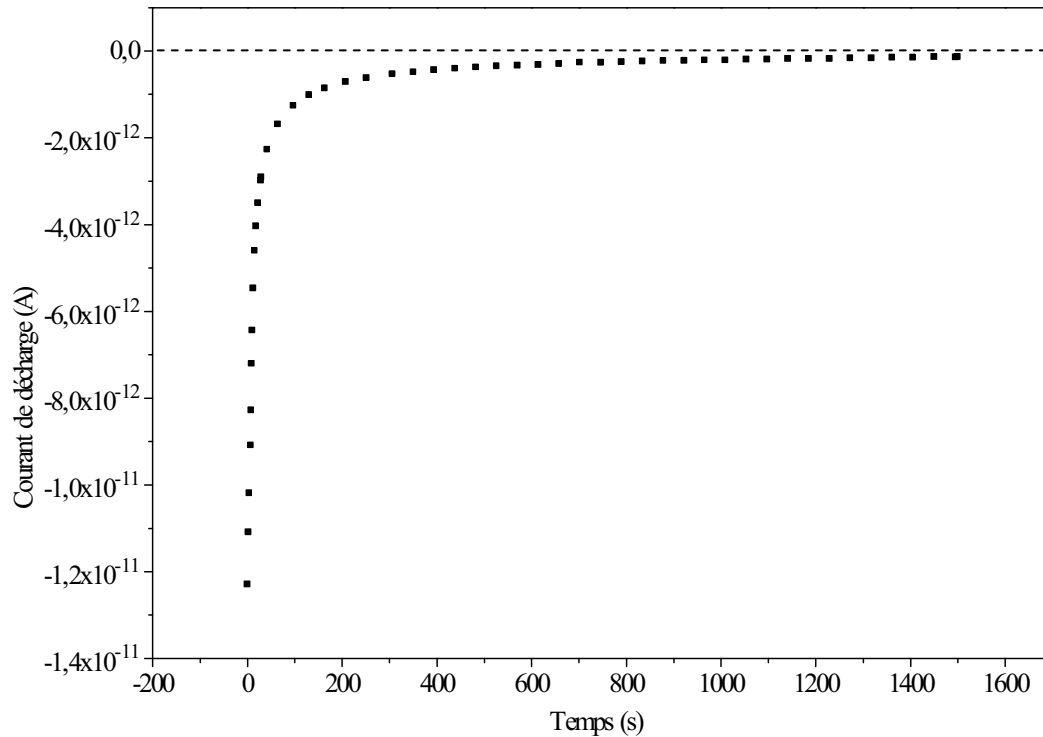


**Fig. IV.7** Variation temporelle du courant de charge du PS vierge.

On constate que le courant de charge décroît lentement jusqu'à atteindre la stabilité. Cette stabilité est atteinte au bout de 1200s environ.

#### **B. Evolution temporelle du courant de décharge (ou de dépolarisation)**

Ce courant est obtenu en court-circuitant les armatures des électrodes ( $V=0V$ ) pendant une période de 1500s. L'évolution de ce courant en fonction du temps est représentée sur la figure IV.8.

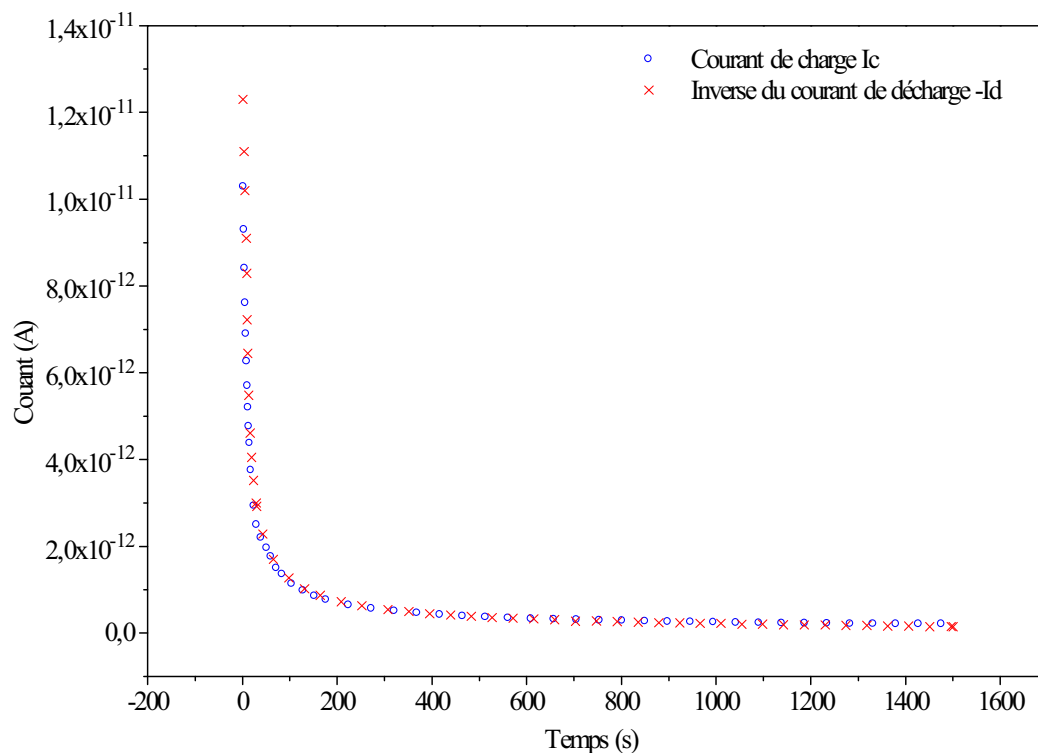


**Fig. IV.8** Variation temporelle du courant de décharge du PS vierge.

On remarque que le courant de décharge décroît très rapidement durant la première centaine de secondes et continu à décroître lentement jusqu'à se stabilisé au voisinage de zéro.

### **C. Comparaison des courants de charge et de décharge**

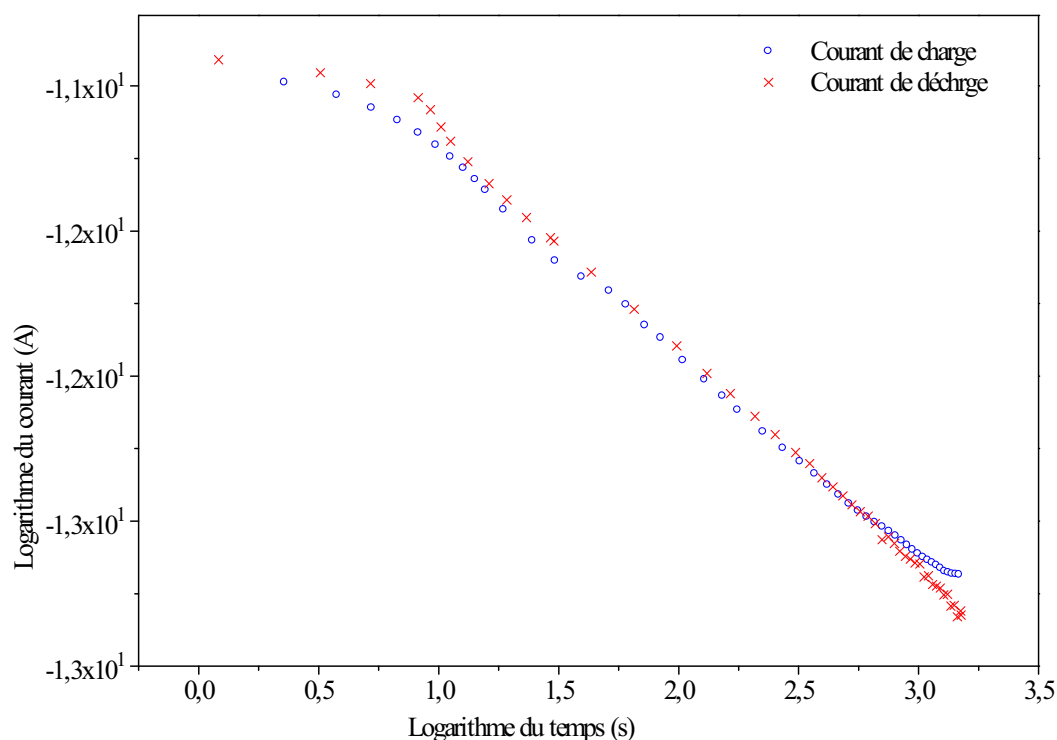
Pour faire une comparaison entre le courant de charge et de décharge, on doit multiplier les valeurs de ce dernier par (-1) pour une représentation logarithmique.



**Fig. IV.9** Variation temporelle du courant de charge et de décharge du PS vierge.

D'après la figure IV.9, on constate que le courant de décharge est l'inverse du courant de charge ( $i_{ch.} = -i_{dech.}$ ), ce qui confirme l'étude théorique du paragraphe II.2.1.3.

- La figure IV.10, représente la variation temporelle de  $\text{Log } I_c$  et de  $\text{Log } (-I_d)$  en fonction de  $\text{Log } t$ .

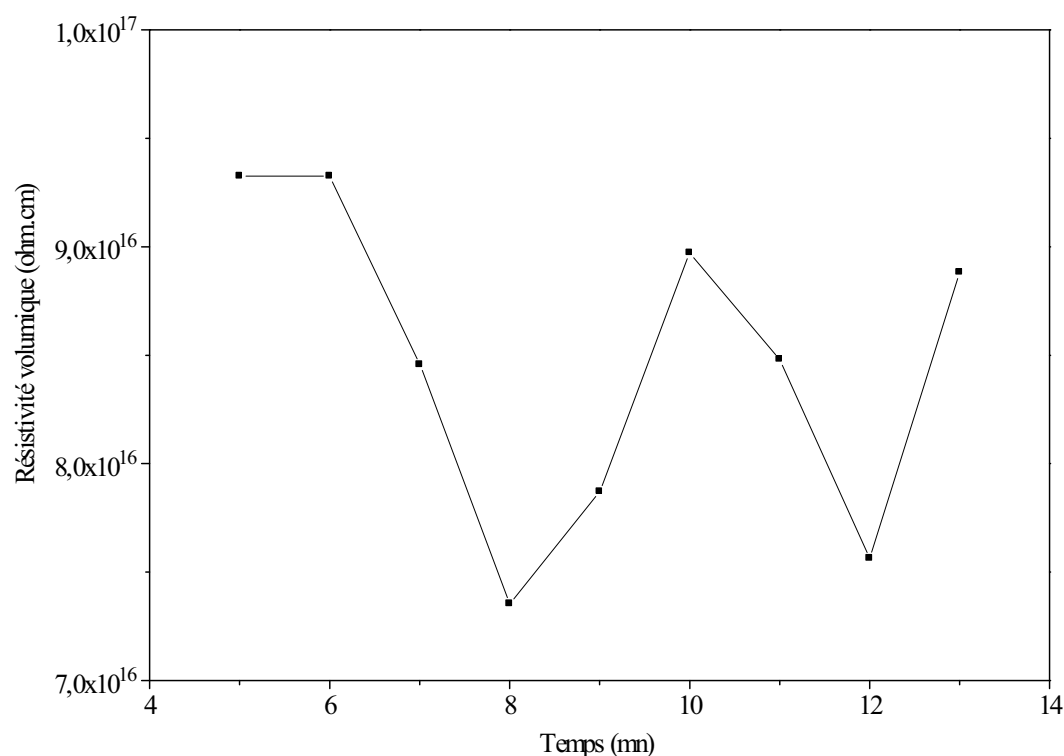


**Fig. IV.10** Variation temporelle du courant de charge et de décharge à l'échelle logarithmique du PS vierge.

Les deux courbes (charge et décharge) sont presque identiques. On peut dire alors qu'il n'y a pas eu formation de charges d'espace et que l'échantillon (PS) ne contient pas de beaucoup d'impureté.

#### ***D. Evolution temporelle de la résistivité volumique***

La résistivité volumique est mesurée en appliquant un signal carré de 1000V d'amplitude pendant une demi-période de 60s. L'évolution temporelle de la résistivité volumique est représentée sur la figure IV.11.

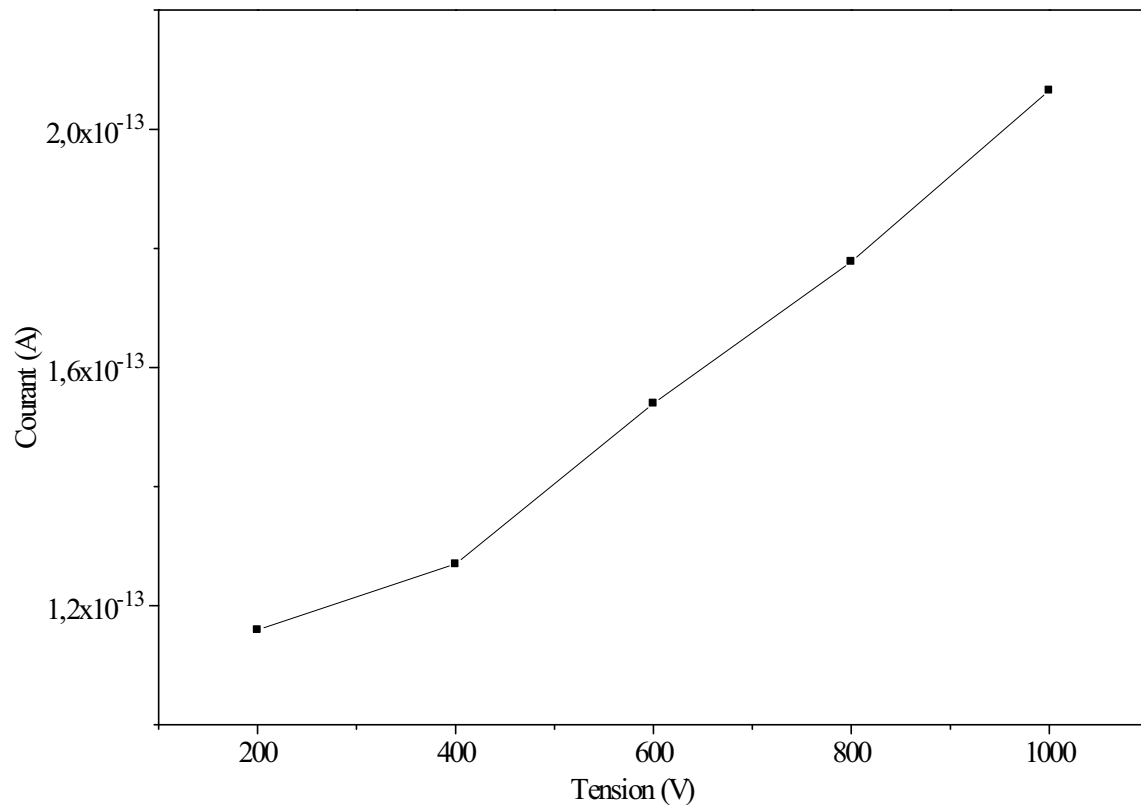


**Fig. IV.11** Variation temporelle de la résistivité volumique du PS vierge.

Le graphe de la résistivité volumique donnée par la figure IV.11 montre que la variation de la résistivité volumique est très faible, elle est de l'ordre de 1,79% seulement. Pour la suite de notre travail on se contentera de prendre la première valeur.

#### ***E. Caractéristique courant-tension $I(V)$***

La figure IV.12 montre la variation du courant de conduction ( $t=1500s$ ) en fonction de la tension appliquée.



**Fig. IV. 12** Caractéristique du courant en fonction de la tension du PS vierge

D'après la figure IV.12, on constate que la caractéristique de  $I(V)$  du PS vierge a la forme d'une droite. Pour les valeurs de la tension de 200V à 400V (des champs faibles) la pente de la caractéristique est inférieure à 1 (pente  $\alpha=0,055$ ), donc le matériau a un comportement ohmique (la résistivité volumique  $\rho$  ne varie pas en fonction du champ électrique).

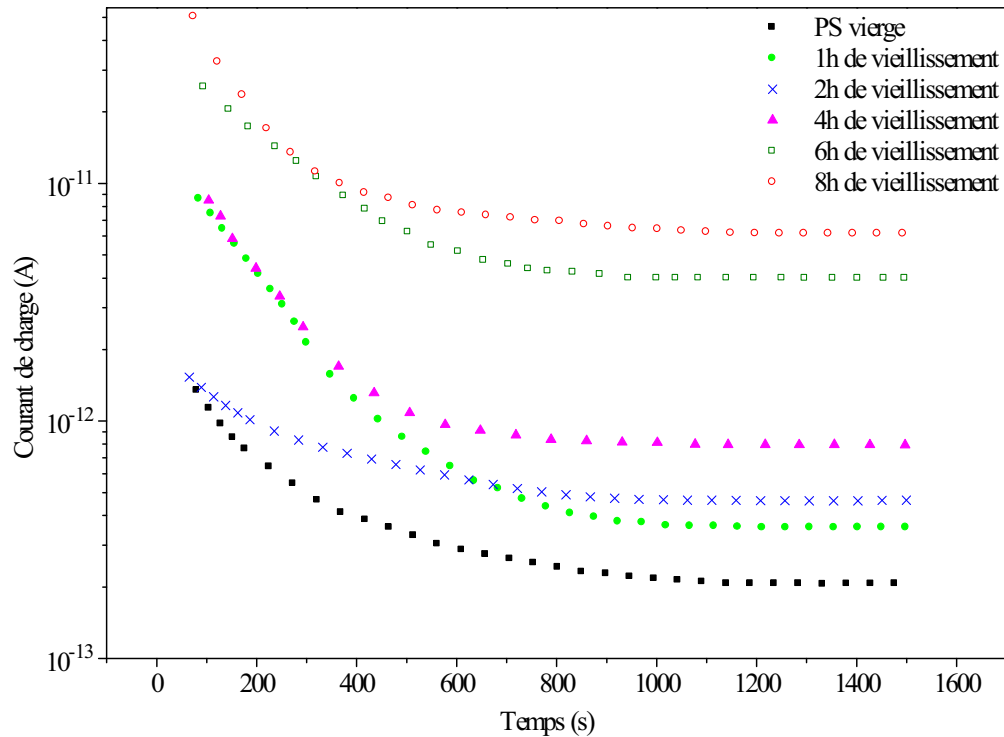
#### ***F. Influence du vieillissement électrique***

Dans cette partie, les échantillons vont subir un vieillissement électrique pendant différentes durées (1h, 2h, 4h, 6h et 8heures), sous une tension alternative de  $10kV_{eff}$ . Juste après vieillissement, on mesure le courant de charge durant 1500s, ainsi que le courant de décharge durant le même temps, puis on mesure la résistivité volumique durant 60s.

##### ***F.1. Influence sur les courants de conduction***

L'influence du vieillissement électrique sur les courants de conduction (de 150s à 1500s) du PS est représentée sur la figure IV.13.

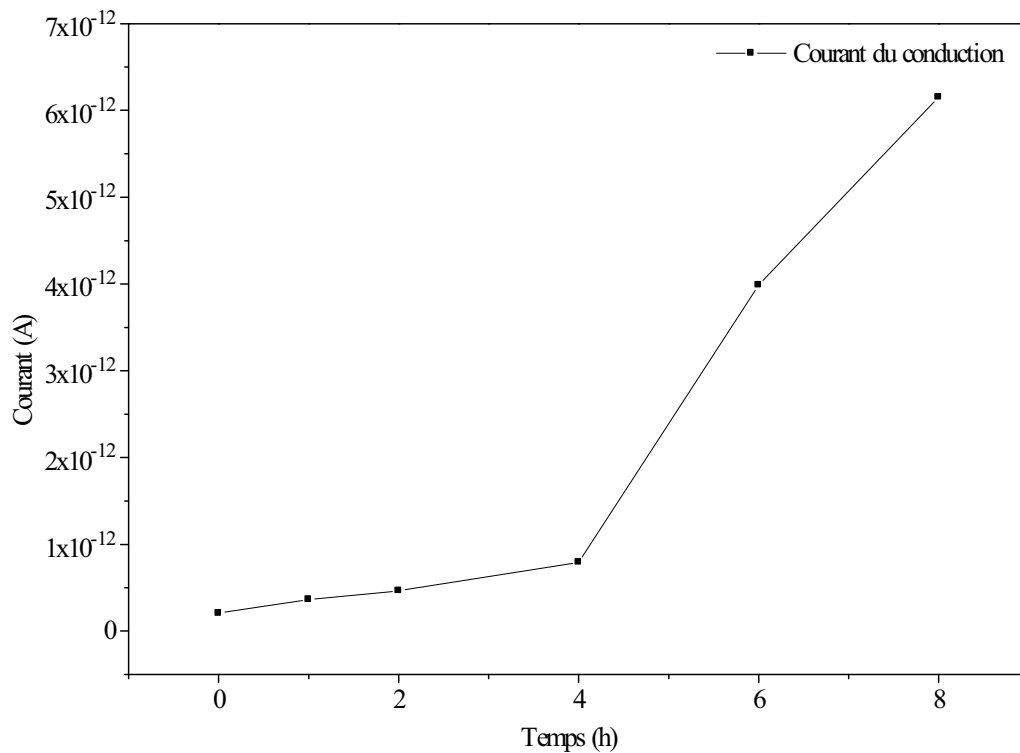




**Fig. IV.13** Variation temporelle du courant de conduction pour différents temps du vieillissement du PS.

On constate que le courant de conduction augmente avec l'augmentation du temps de vieillissement. Cette augmentation est d'autant plus grande que le temps de vieillissement notamment au delà de 4h de vieillissement comme le montre la figure IV.14.

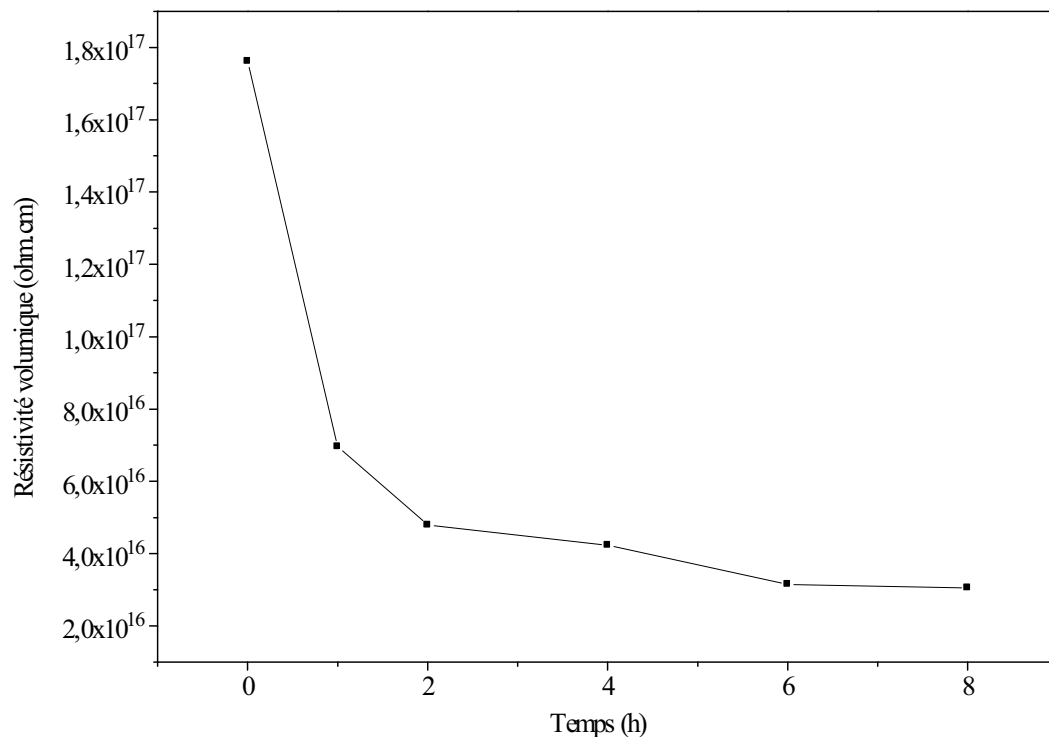
► En prenant le dernier point de chaque courbe, on aura l'évolution du courant de conduction du PS sous l'effet du temps de vieillissement, qui est représentée sur la figure IV.14.



**Fig. IV.14** Influence du temps de vieillissement sur le courant de conduction du PS.

### F.2. Influence sur la résistivité volumique

La variation de la résistivité volumique en fonction du temps de vieillissement est montrée par la figure IV.15.



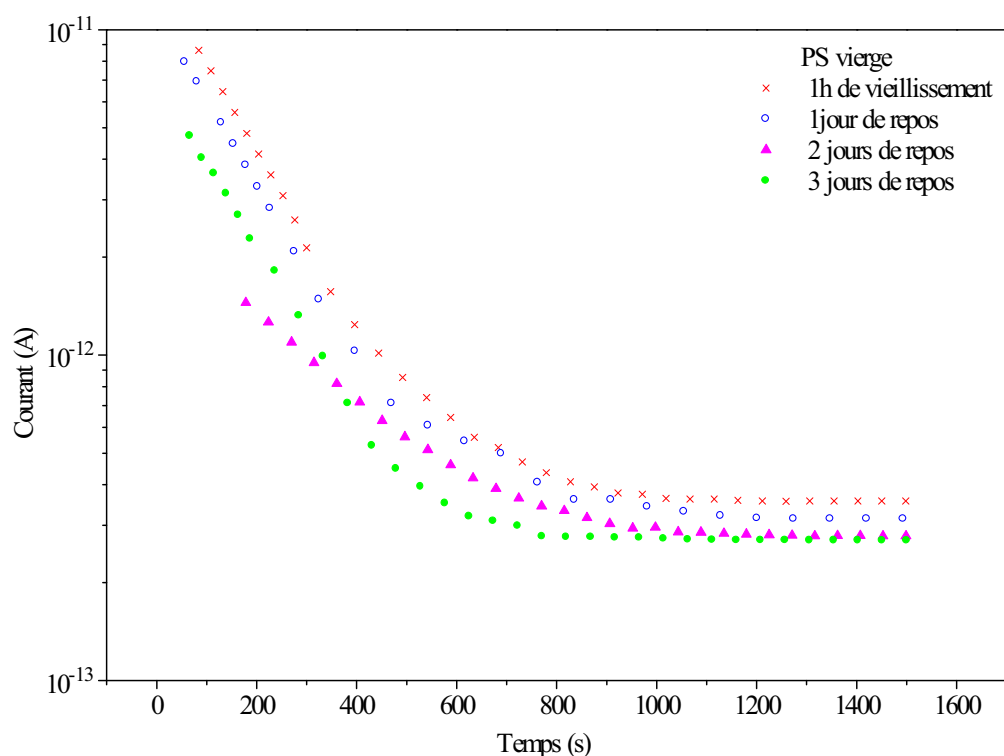
**Fig. IV.15** Influence du temps de vieillissement sur la résistivité volumique du PS.

On constate que la résistivité volumique diminue avec l'augmentation du temps de vieillissement.

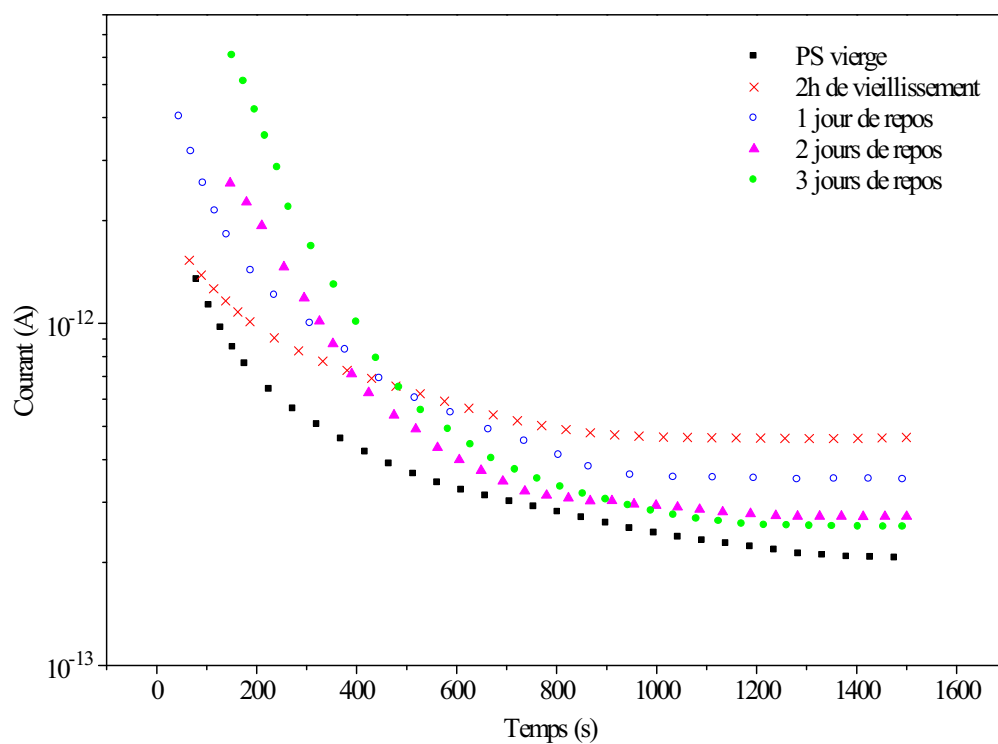
### ***G. Influence du temps de repos***

Dans cette partie, on mesure les courants de conduction et les résistivités volumiques après avoir laissé les échantillons au repos pendant plusieurs jours (1 à 4 jours) dans un milieu sec (dessiccateur pour absorber l'humidité).

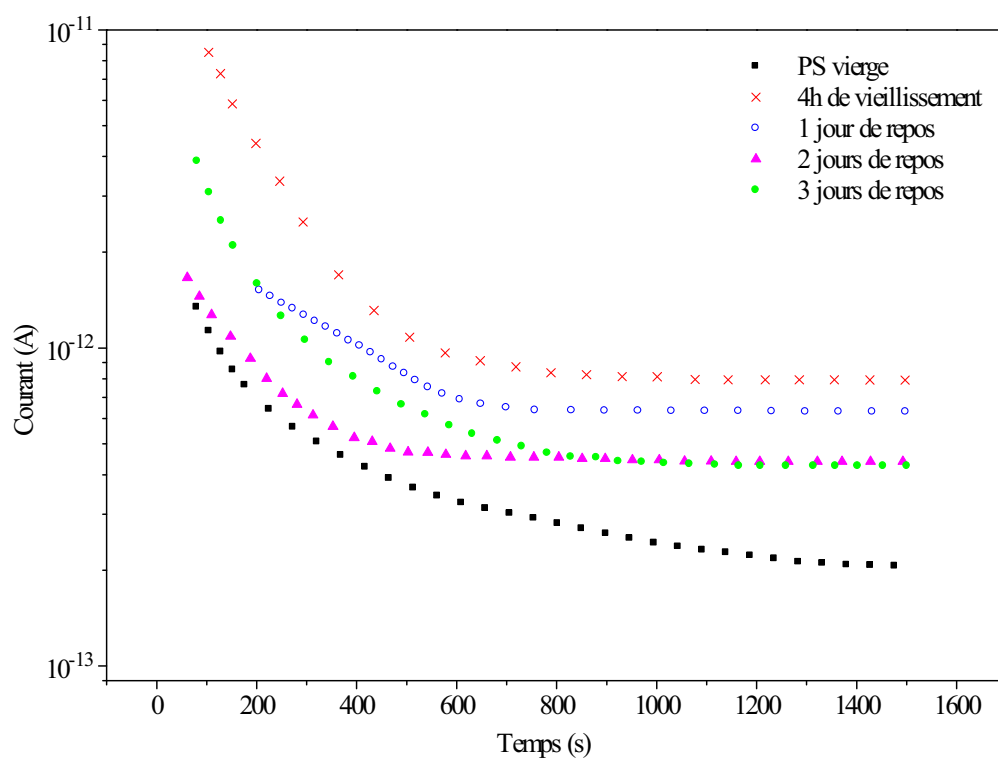
#### ***G.1. Influence sur la conduction électrique***



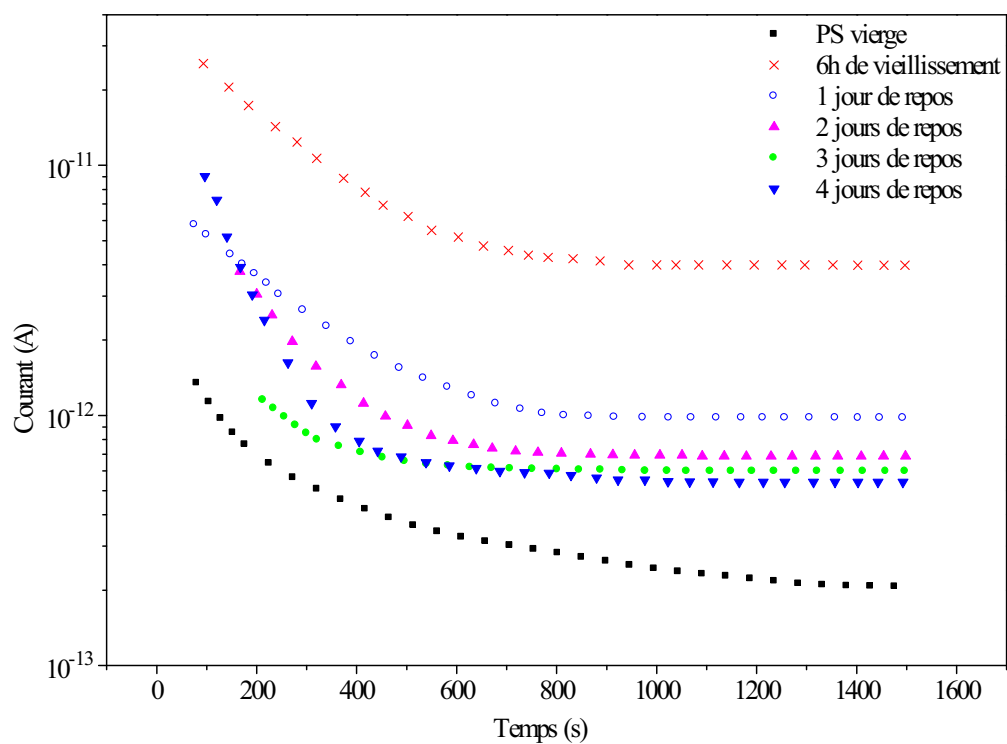
***Fig. IV.16*** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli 1 heure.



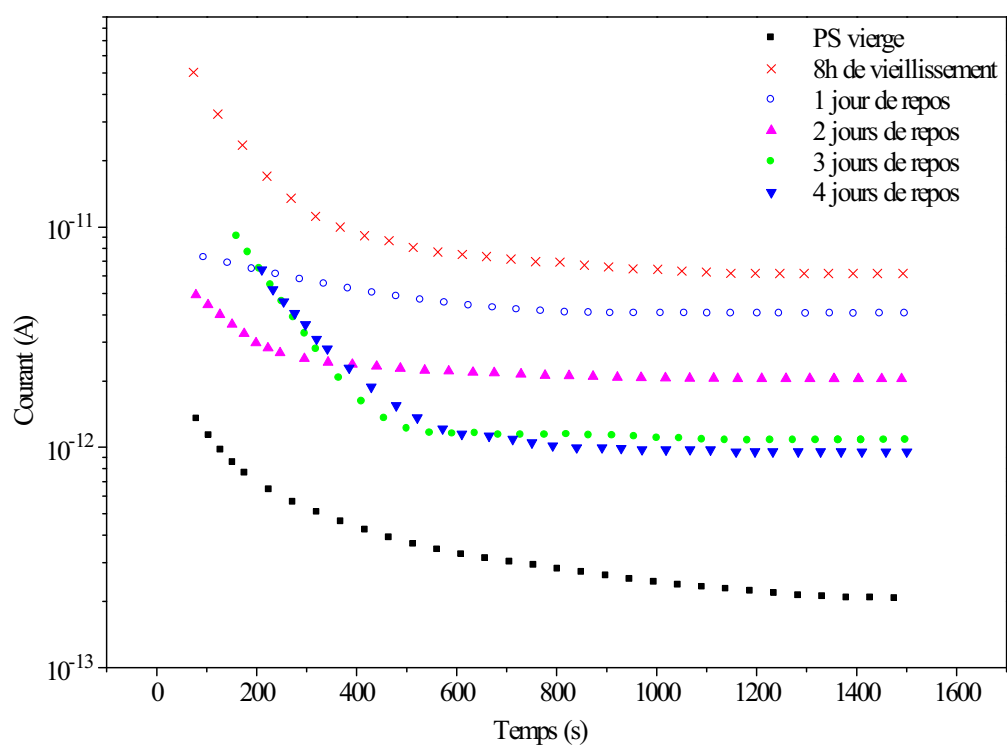
**Fig. IV.17** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli 2 heures.



**Fig. IV.18** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli 4 heures.



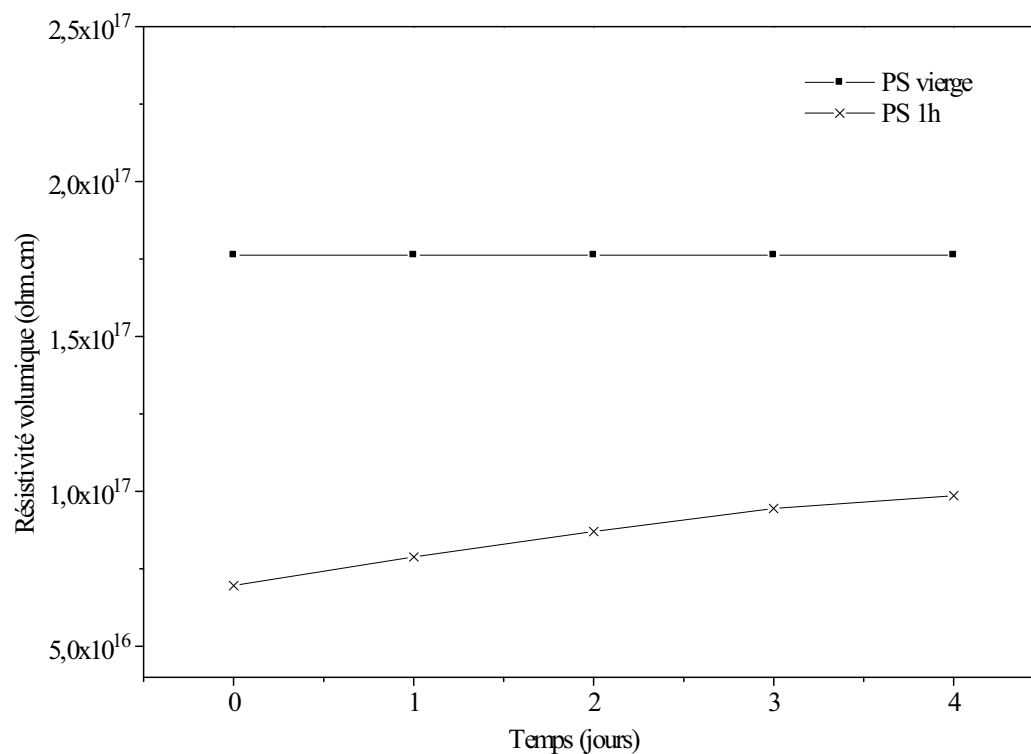
**Fig. IV.19** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli 6 heures.



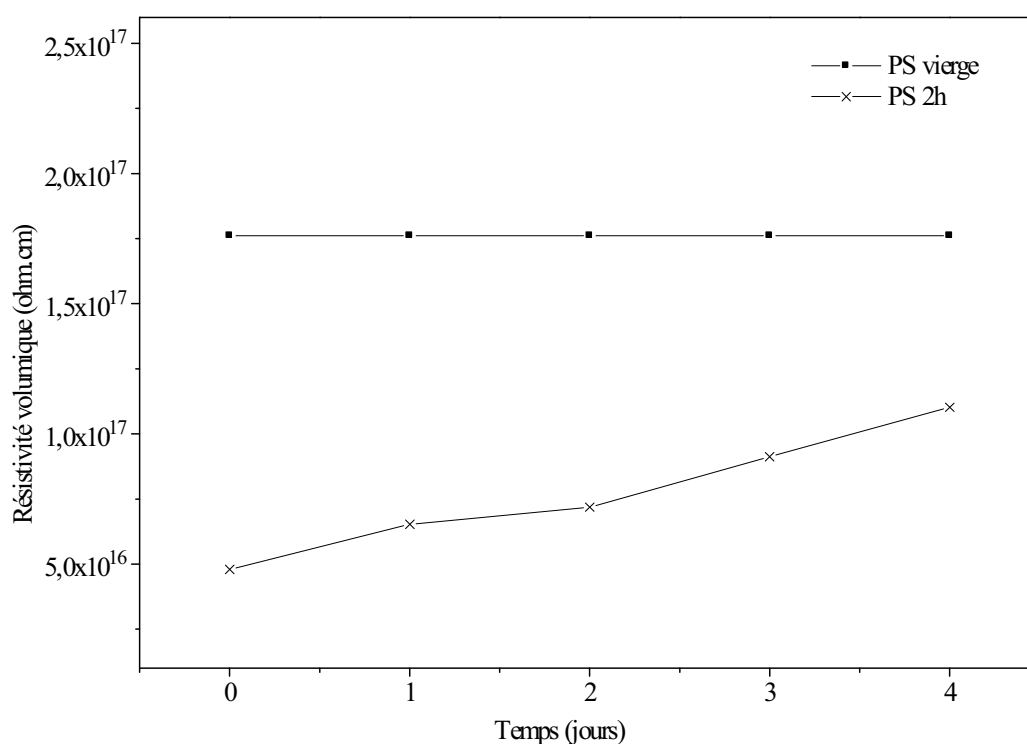
**Fig. IV.20** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PS vieilli 8 heures.

Les figures IV.16 à IV.20 montrent que le PS reprend partiellement ses caractéristiques isolantes après un certain temps de repos (24h à 48h) dans un environnement sec.

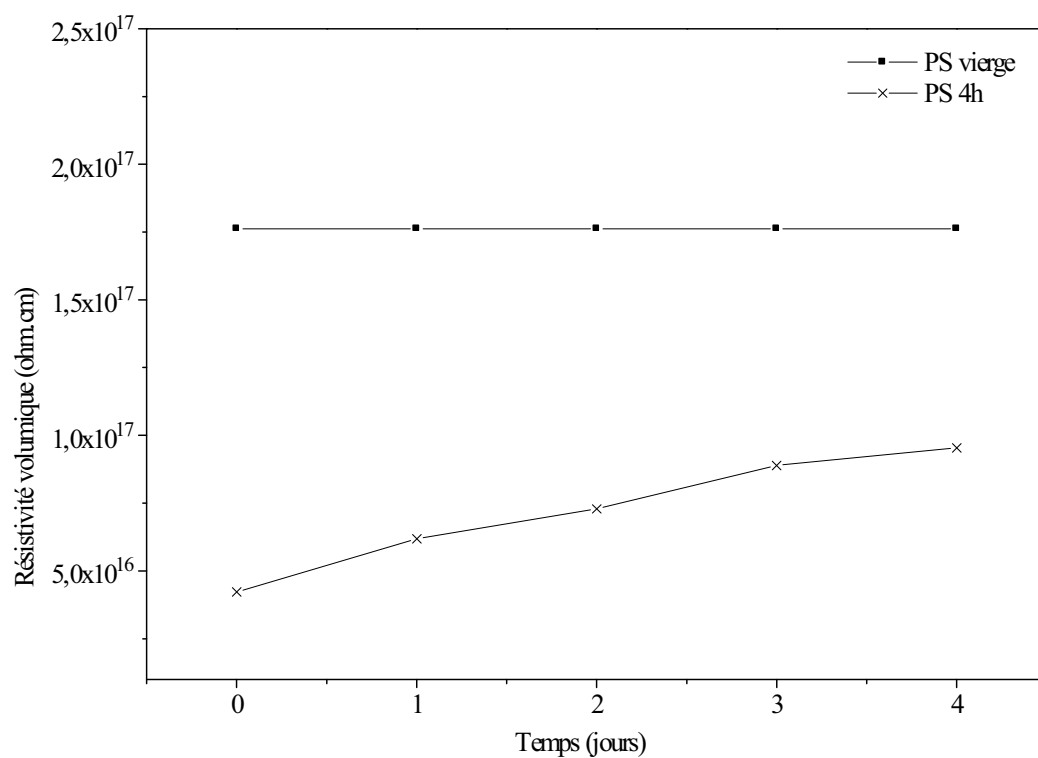
### G.2. Influence sur la résistivité volumique



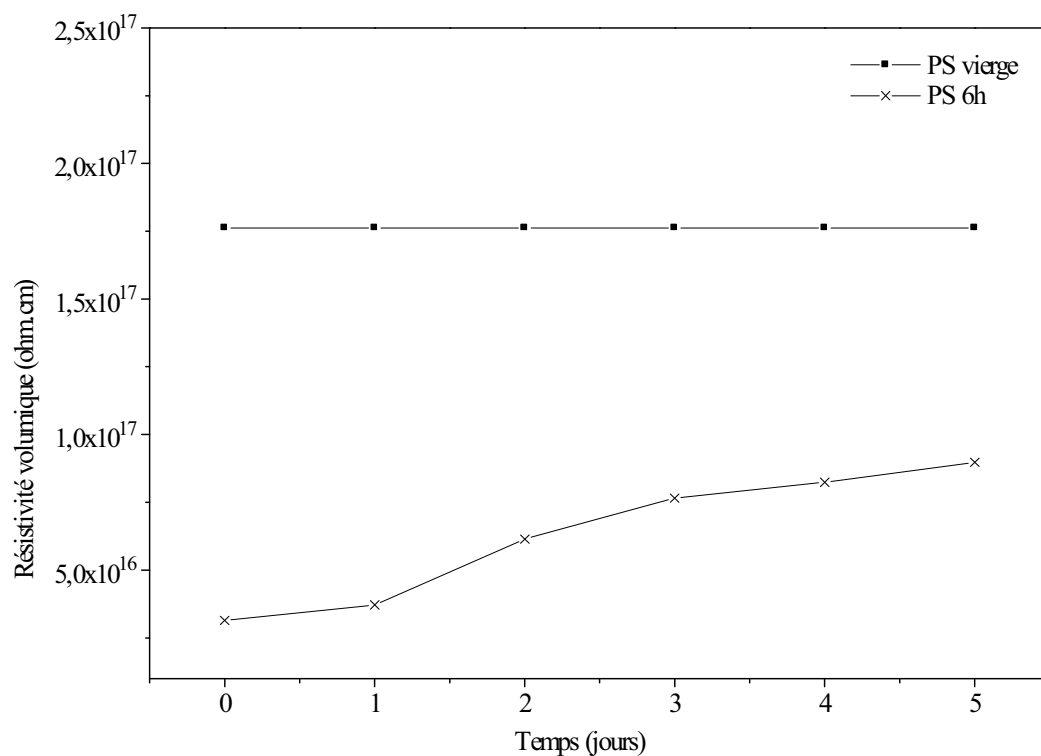
**Fig. IV.21** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli 1 heure.



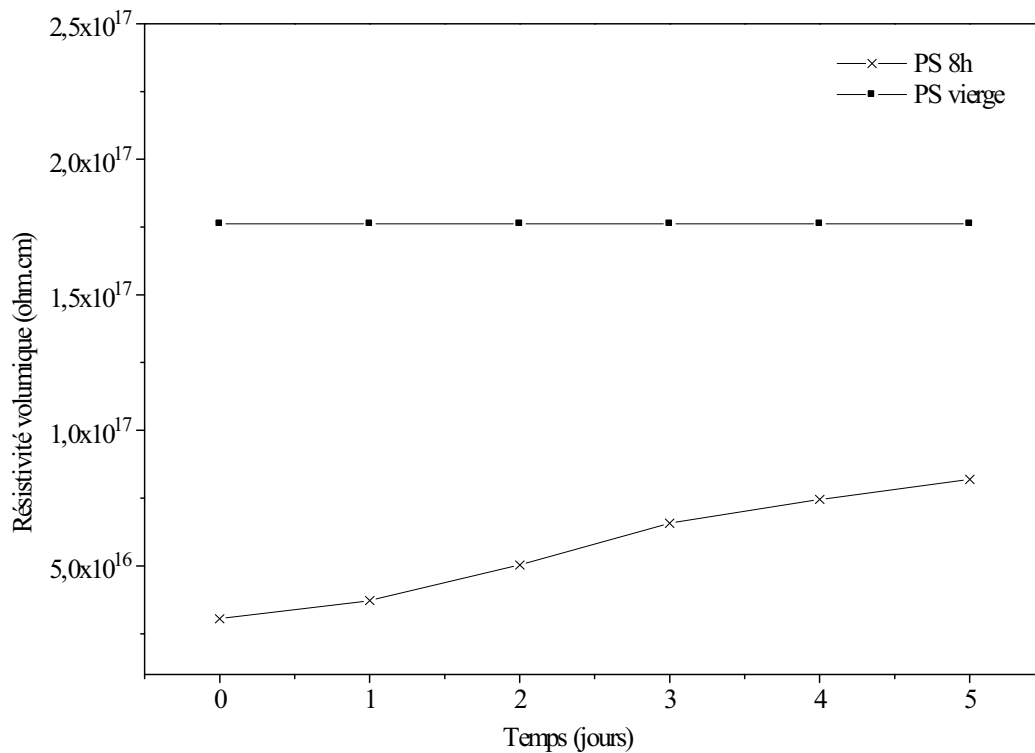
**Fig. IV.22** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli 2 heures.



**Fig. IV.23** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli 4 heures.



**Fig. IV.24** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli 6 heures.



**Fig. IV.25** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PS vieilli 8 heures.

#### **IV.4.2. Etude du poly méthacrylate de méthyle (PMMA)**

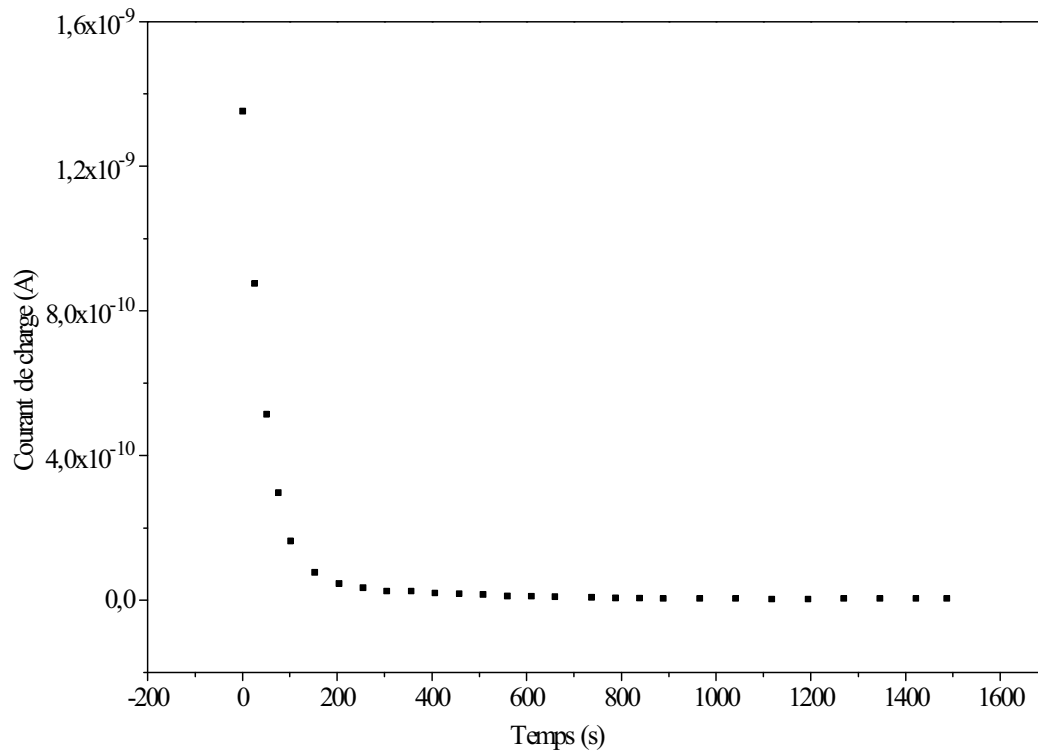
##### **IV.4.2.1. Etude de la conduction électrique**

##### **A. Evolution temporelle du courant de charge**

##### **A.1. Courant de charge (0 à 1500 s)**

L'évolution temporelle du courant de charge du PMMA vierge est représentée sur la figure IV.26.





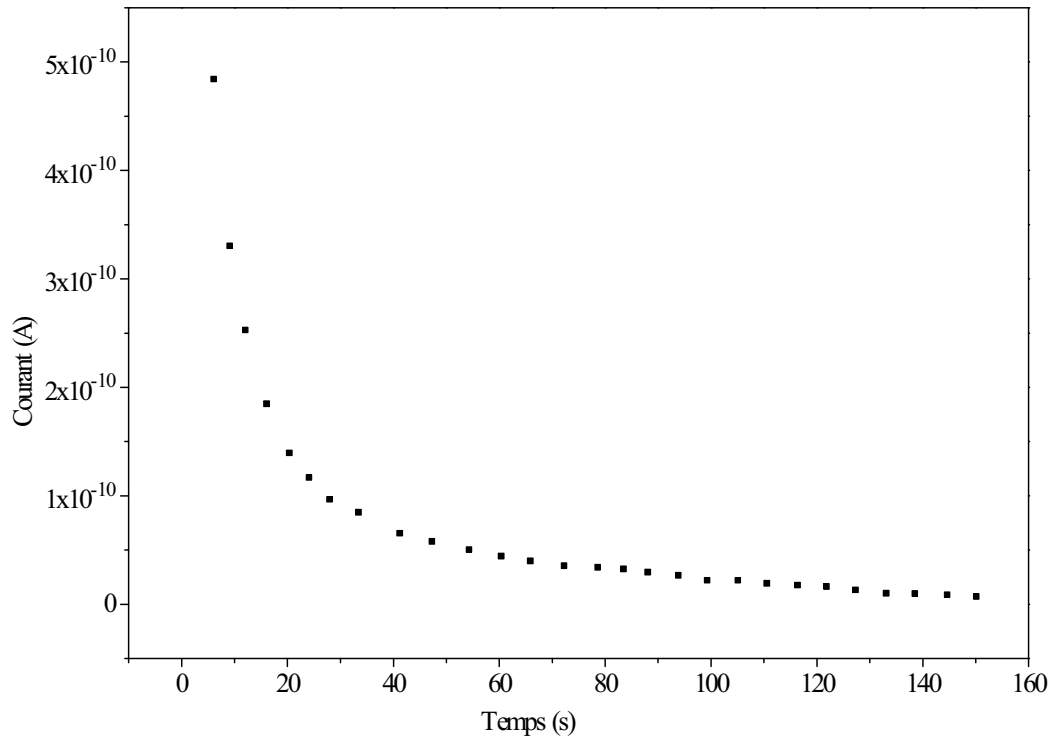
**Fig. IV.26** Variation temporelle du courant de charge du PMMA vierge.

On constate que le courant de charge chute très rapidement durant les première dizaines de seconde puis continue de décroître lentement (légère variation) jusqu'à atteindre la stabilité.

Pour déterminer approximativement le début de la conduction on zoome deux plages de 0 à 150s et de 150 à 1500s.

#### **A.2. Courant transitoire (absorption)**

La figure IV.27 montre l'évolution temporelle du courant d'absorption.

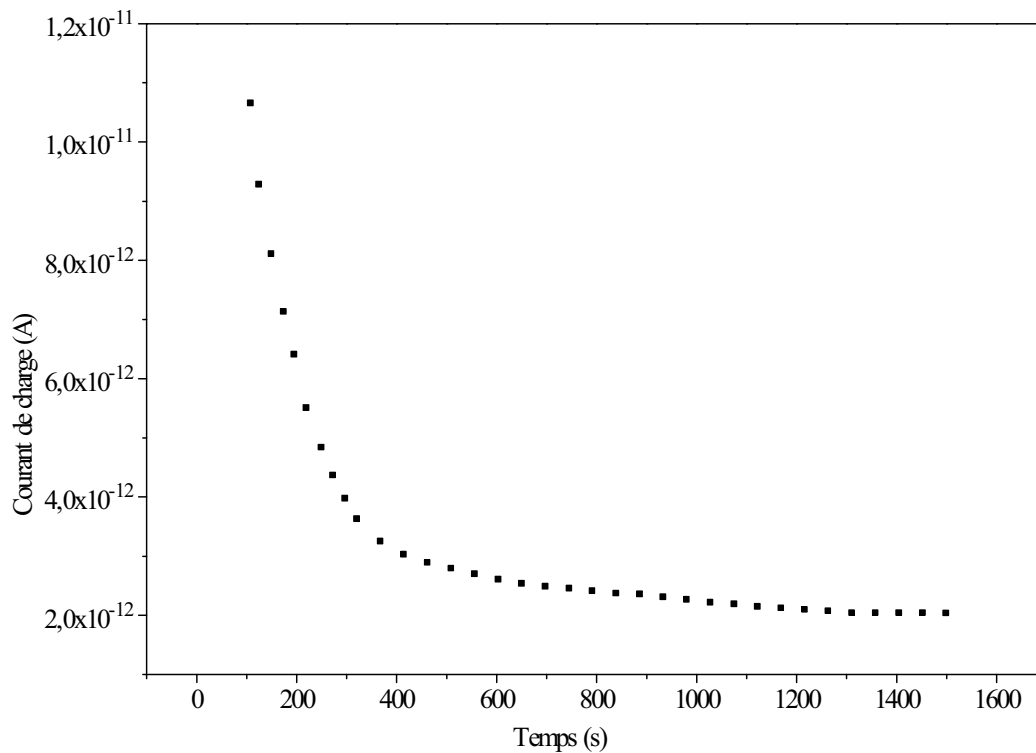


**Fig. IV.27** Variation temporelle du courant transitoire du PMMA vierge.

On remarque une chute brusque survient au bout de 30 s environs.

### **A.3. Courant de conduction**

On prend la partie 150 à 1500 s, on aura l'évolution du courant de conduction qui est représenté sur la figure IV.28.

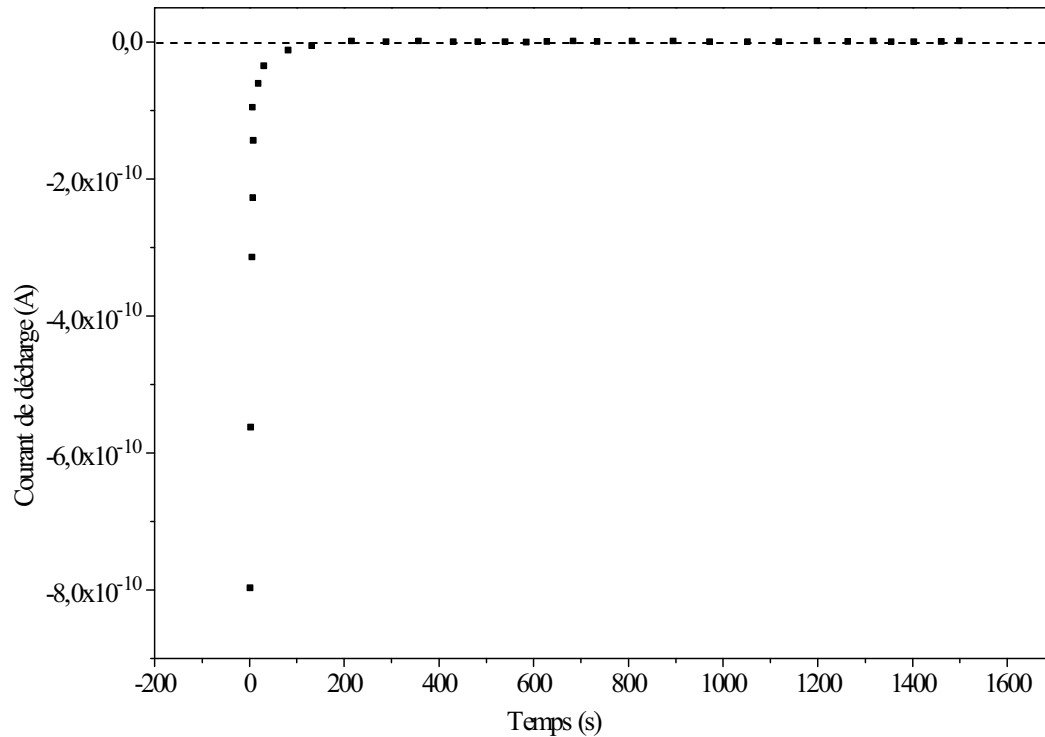


**Fig. IV.28** Variation temporelle du courant de conduction du PMMA.

On constate que le courant de charge décroît lentement jusqu'à atteindre la stabilité au environs de 1200s. 1200s correspond alors à la frontière entre le courant transitoire et le courant de conduction.

#### ***B. Evolution temporelle du courant de décharge (ou de dépolarisation)***

Ce courant est obtenu on court-circuite les armatures des électrodes ( $V=0V$ ) pendant une période de 1500 s. L'évolution de ce courant en fonction du temps est représentée sur la figure IV.29.

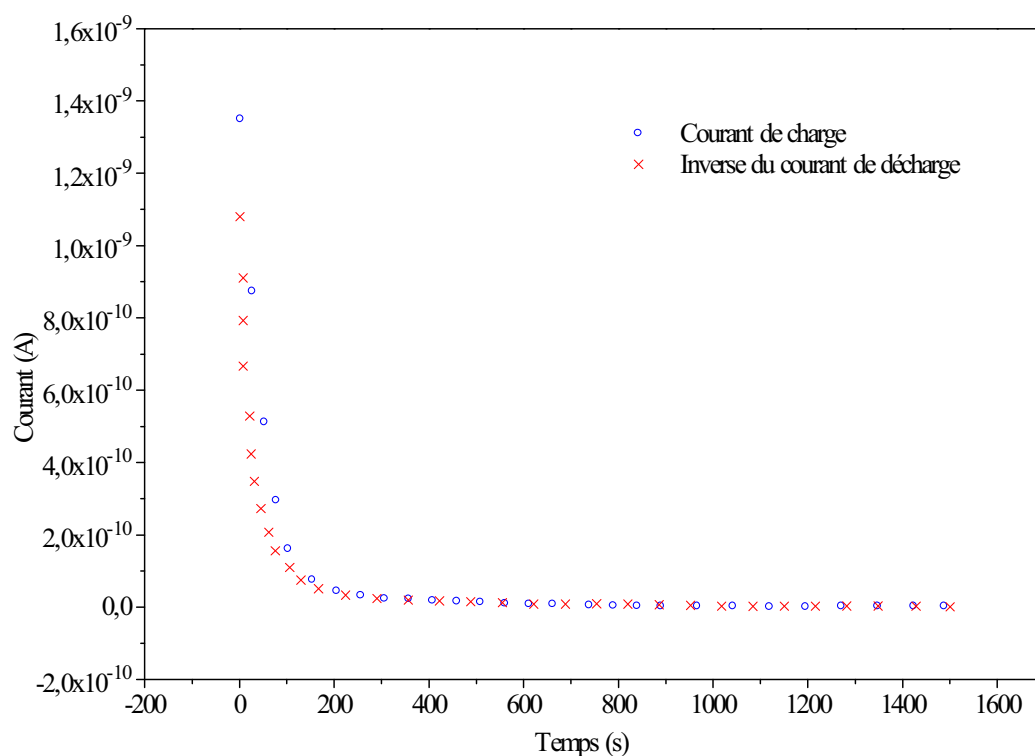


**Fig. IV.29** Variation temporelle du courant de décharge du PMMA vierge.

On remarque que le courant de décharge décroît durant les premières dizaines de secondes et continu à décroître lentement jusqu'à se stabilisé au voisinage de zéro.

### **C. Comparaison des courants de charge et de décharge**

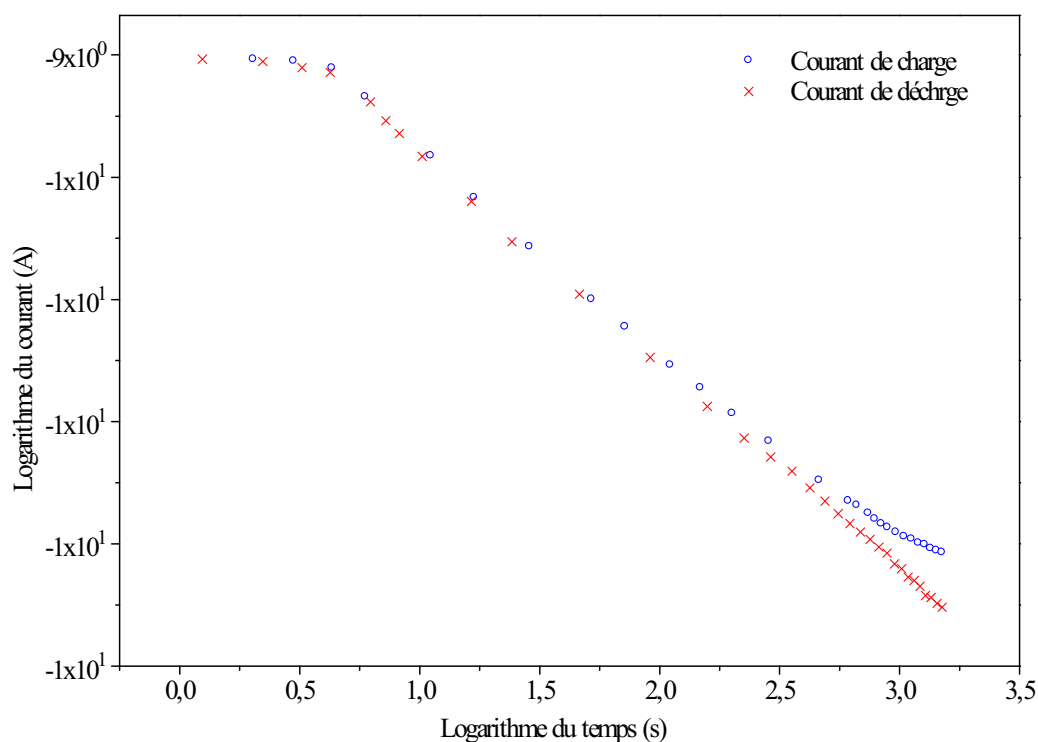
Pour faire une comparaison entre le courant de charge et de décharge, on doit multiplier les valeurs de ce dernier par (-1) pour une représentation logarithmique.



**Fig. IV.30** Variation temporelle du courant de charge et de décharge du PMMA vierge.

D'après la figure IV.30, on constate que le courant de décharge est l'inverse du courant de charge ( $i_{ch.} = -i_{dech.}$ ), ce qui confirme l'étude théorique du paragraphe II.2.1.3.

La figure IV.31 représente la variation temporelle de  $\text{Log}I_c$  et de  $\text{Log}(-I_d)$  en fonction de  $\text{Log}t$ .

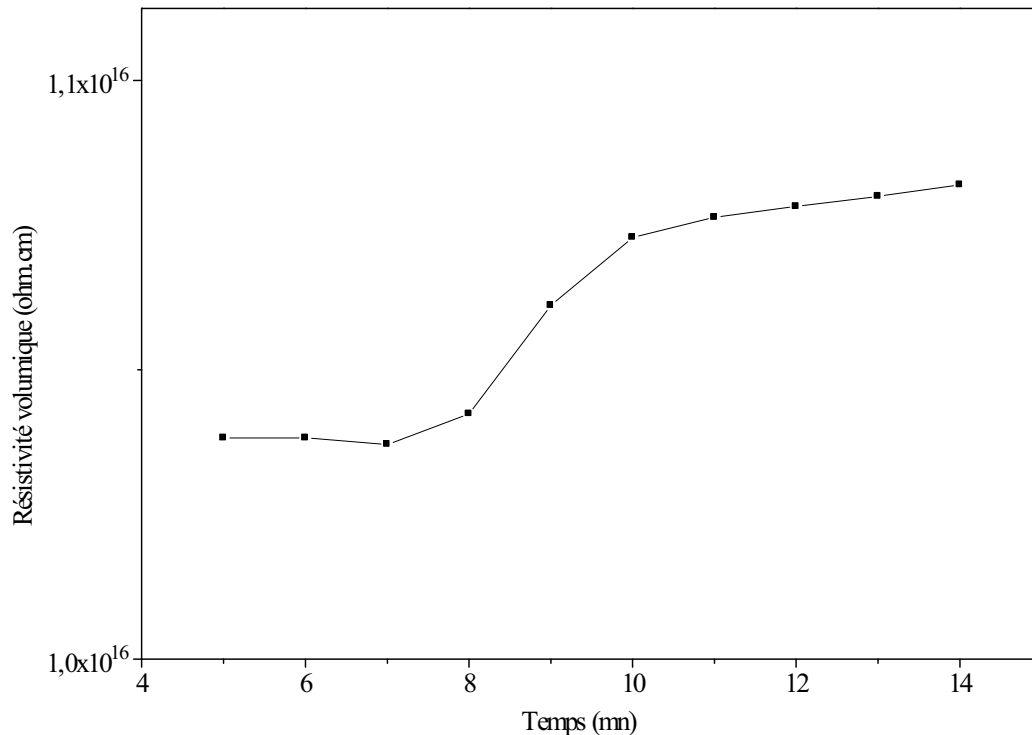


**Fig. IV.31** Variation temporelle du courant de charge et de décharge à l'échelle logarithmique du PMMA vierge.

Les deux courbes sont presque identiques. On peut dire alors qu'il n'y a pas eu formation de charges d'espace et que l'échantillon (PMMA) ne contient pas beaucoup d'impureté.

#### ***D. Evolution temporelle de la résistivité volumique***

La résistivité volumique est mesurée en appliquant un signal carré de 1000V d'amplitude pendant une demi-période de 60s. L'évolution temporelle de la résistivité volumique est représentée sur la figure IV.30.

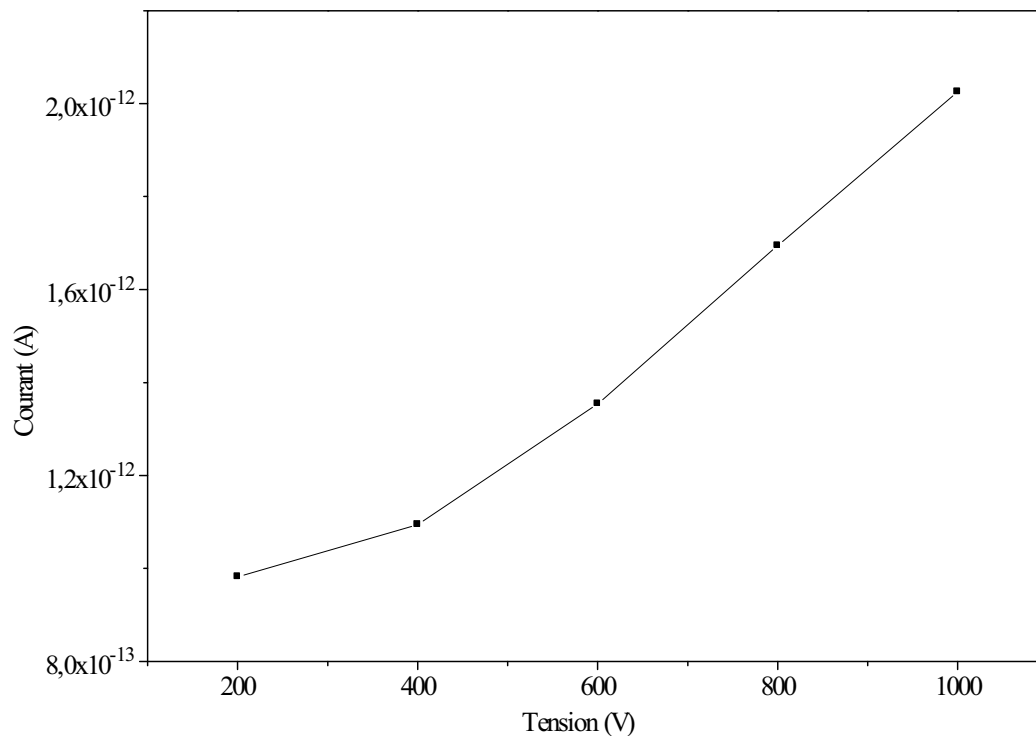


***Fig. IV.32*** Variation temporelle de la résistivité volumique du PMMA vierge.

Le graphe de la résistivité volumique en fonction du temps données par la figure IV.32 montre que la variation est très faible, elle est de l'ordre de 1,97% seulement. Pour la suite de on prendra que la première valeur.

#### ***E. Caractéristique courant-tension $I(V)$***

La figure IV.33 montre la variation du courant de conduction ( $t=1500s$ ) en fonction de la tension appliquée.



**Fig. IV.33** Caractéristique du courant en fonction de la tension du PMMA vierge

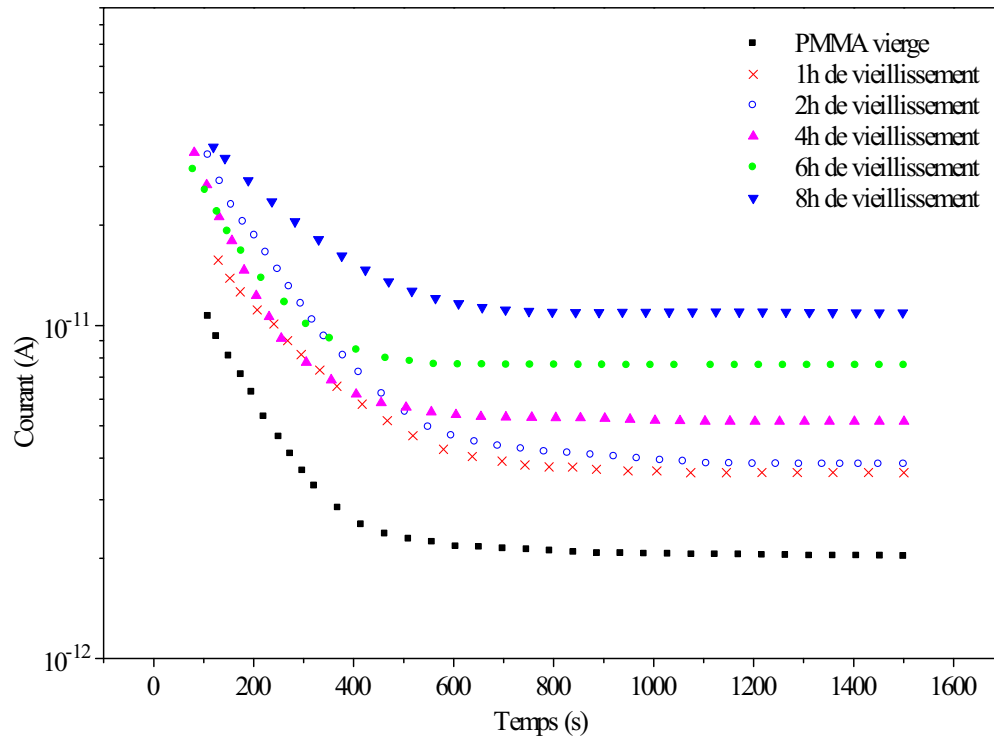
D'après la figure IV.33, on constate que la caractéristique  $I(V)$  du PMMA vierge à la forme d'une droite. Pour les valeurs de la tension de 200V à 400V (des champs faibles) la pente de la caractéristique est inférieure à 1 (pente  $\alpha=0,56$ ), donc le matériau à un comportement ohmique (la résistivité volumique  $\rho$  ne varie pas en fonction du champ électrique).

#### ***F. Influence du vieillissement électrique***

Dans cette partie, les échantillons vont subir un vieillissement électrique pendant différentes durées (1h, 2h, 4h, 6h et 8heures), sous une tension alternative de  $10kV_{eff}$ . Juste après vieillissement, on mesure le courant de charge durant 1500s, le courant de décharge durant la même période, puis on mesure la résistivité volumique pendant 60s.

##### ***F.1. Influence sur les courants de conduction***

L'influence du vieillissement électrique sur les courants de conduction (de 150s à 1500s) du PMMA est représentée sur la figure IV.34.

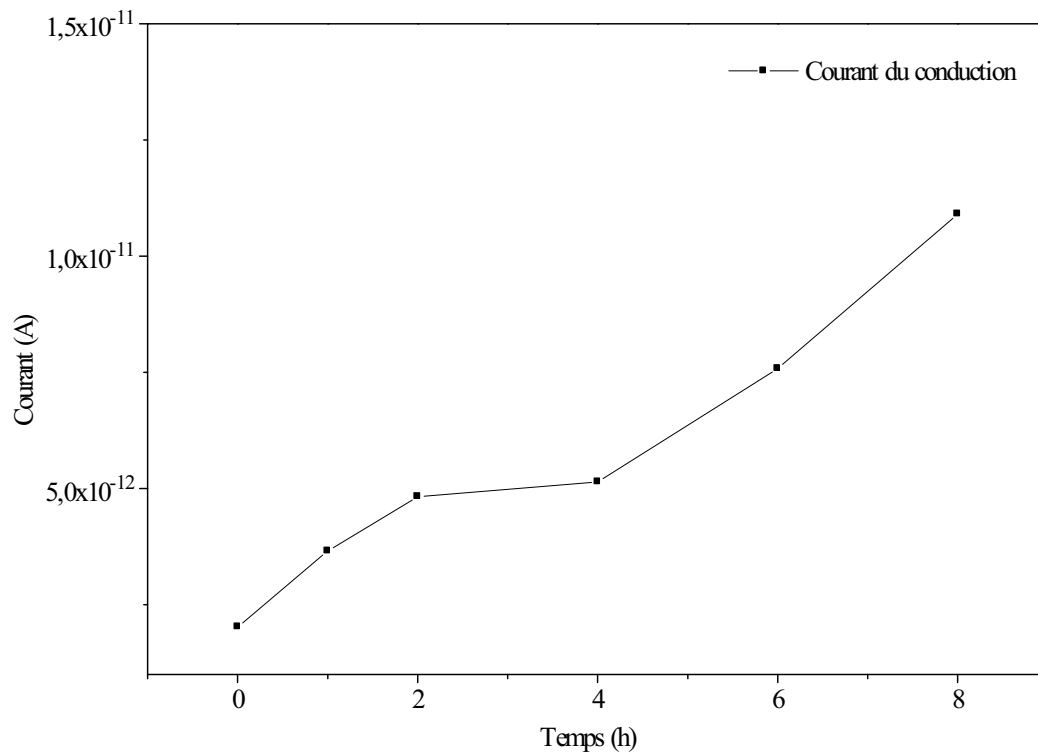


**Fig. IV.34** Variation temporelle du courant de conduction pour différents temps de vieillissement du PMMA.

On constate que le courant de conduction augmente avec l'augmentation du temps de vieillissement. Cette augmentation est d'autant plus grande que le temps de vieillissement est grand notamment au delà de 4h de vieillissement comme le montre la figure IV.35.

► En prenant le dernier point de chaque courbe, on aura l'évolution du courant de conduction du PMMA sous l'effet du temps de vieillissement, qui est représentée sur la figure IV.35.

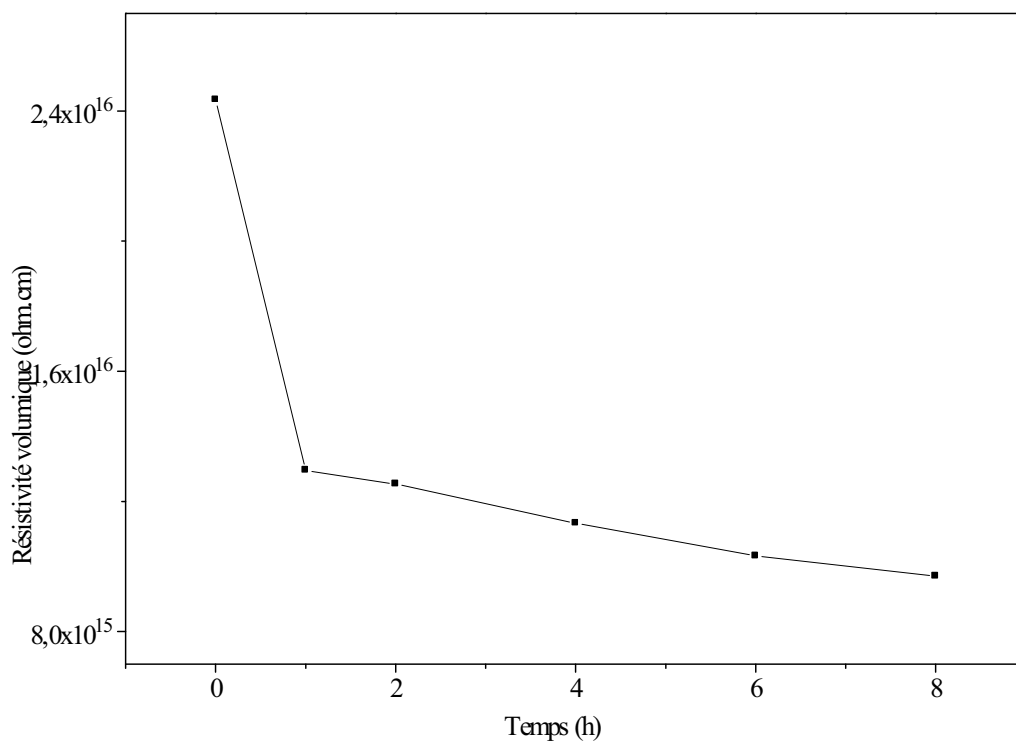




**Fig. IV.35** Influence du temps de vieillissement sur le courant de conduction du PMMA.

### F.2. Influence sur la résistivité volumique

La figure IV.36, montre la variation de la résistivité volumique en fonction du temps de vieillissement du PMMA.



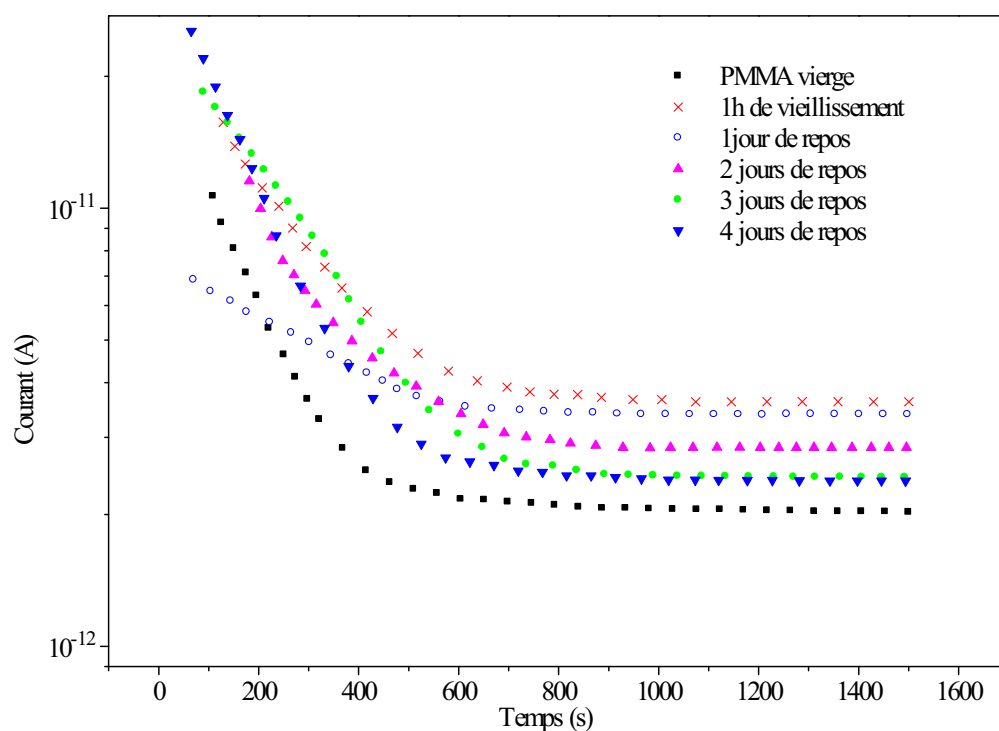
**Fig. IV.36** Influence du temps de vieillissement sur la résistivité volumique du PMMA.

On constate que la résistivité volumique diminue avec l'augmentation du temps de vieillissement.

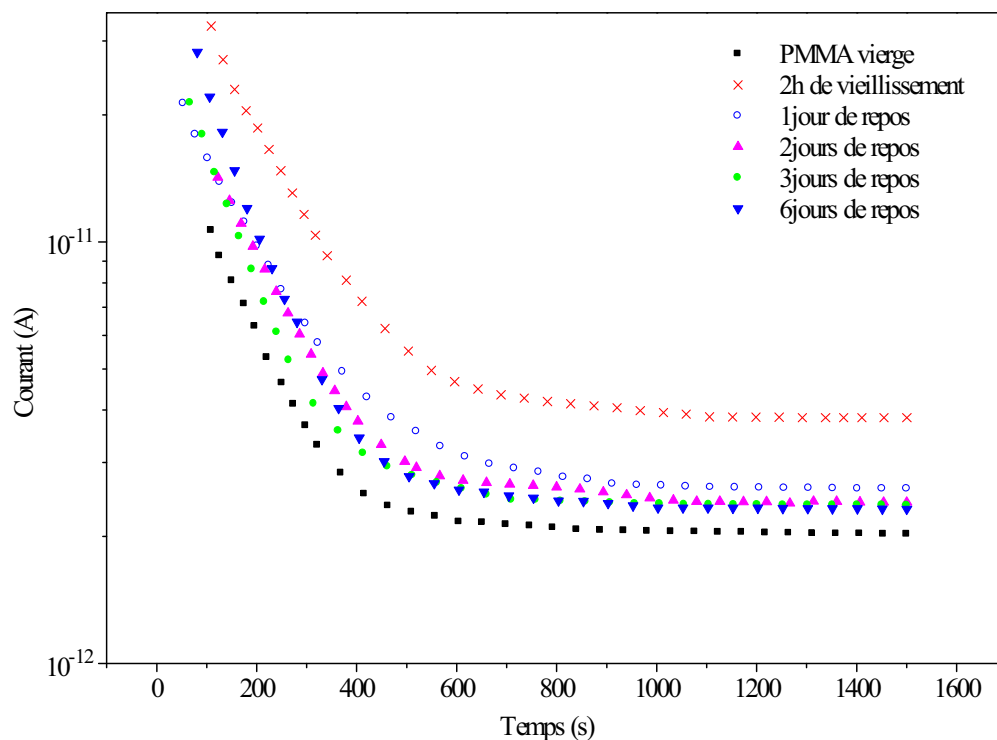
### ***G. Influence du temps de repos***

Dans cette partie, on mesure les courants de conduction et les résistivités volumiques après avoir laissé les échantillons au repos pendant plusieurs jours (1 à 5 jours), dans un milieu sec (dans un dessiccateur pour absorber l'humidité).

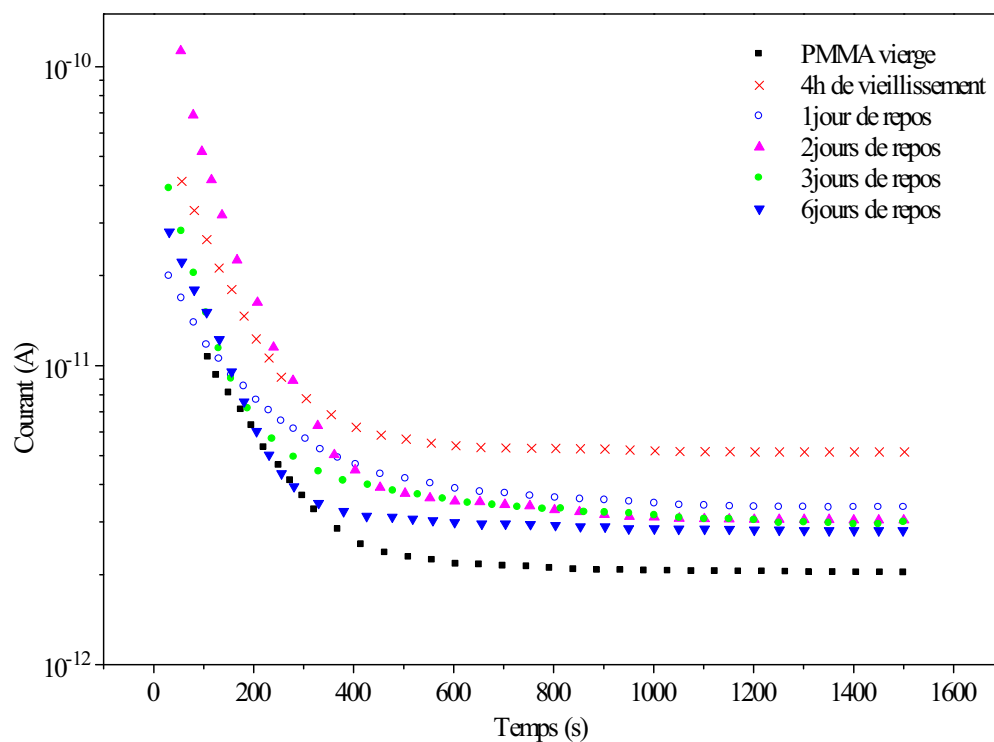
#### ***G.1. Influence sur la conduction électrique***



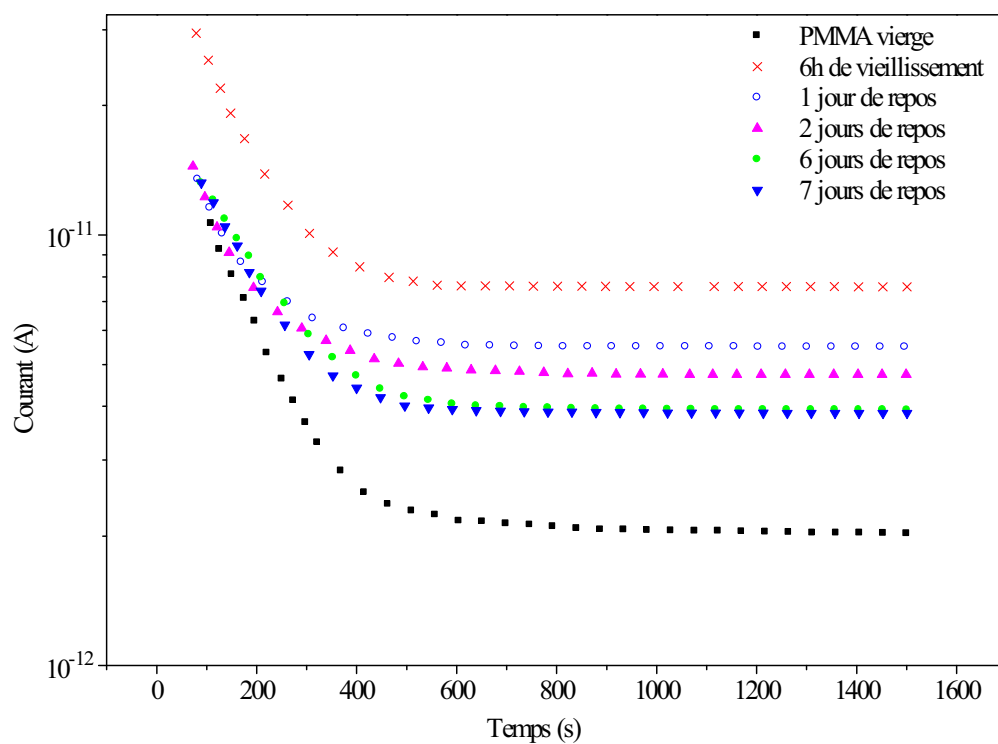
**Fig. IV.37** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PMMA vieilli 1 heure.



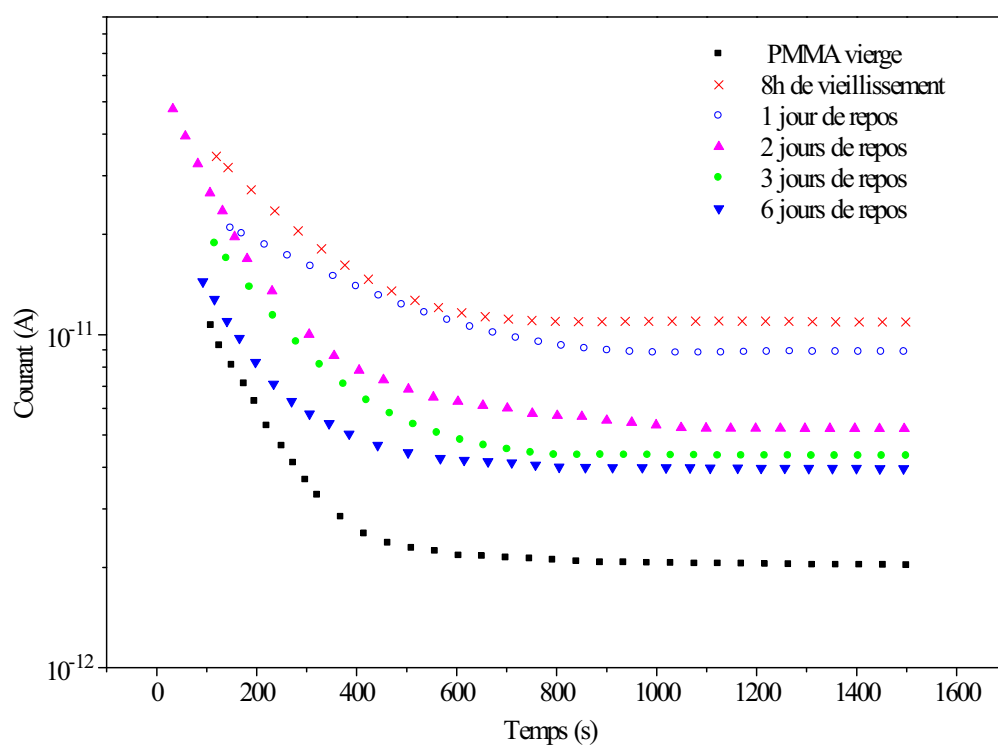
**Fig. IV.38** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PMMA vieilli 2 heures.



**Fig. IV.39** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PMMA vieilli 4 heures.



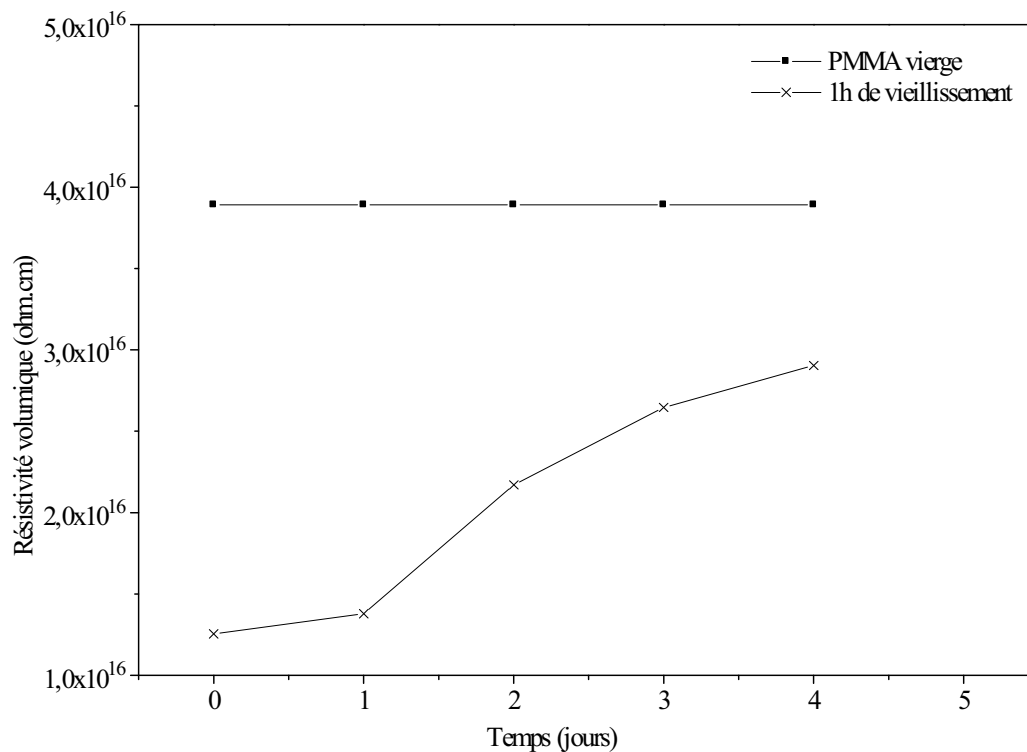
**Fig. IV.40** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PMMA vieilli 6 heures.



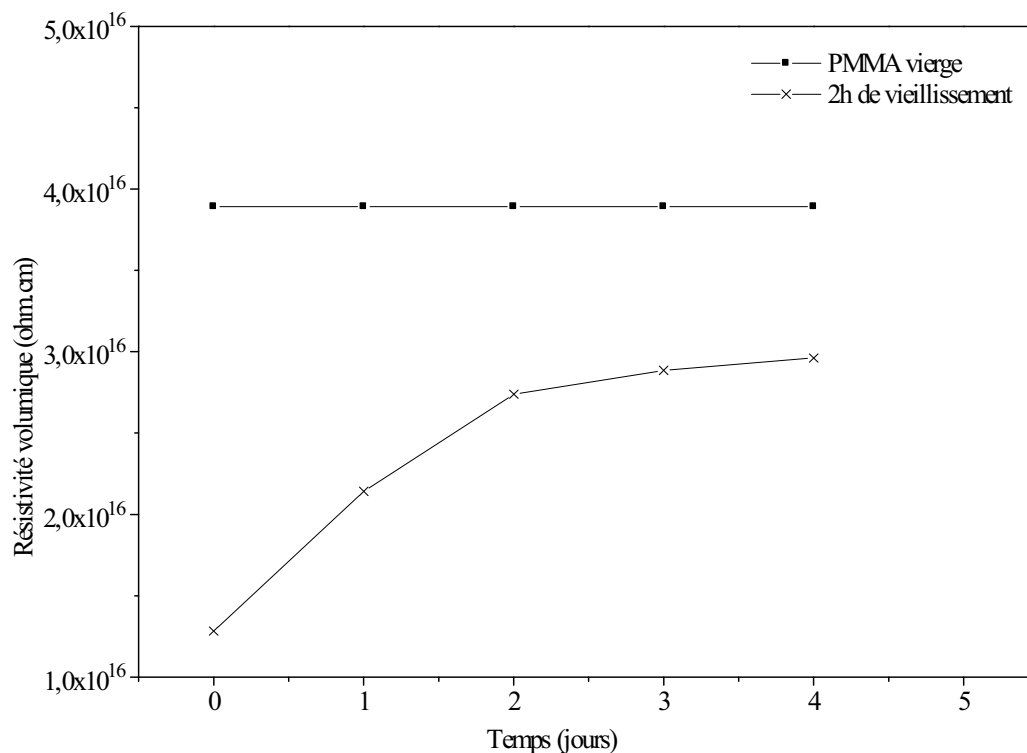
**Fig. IV.41** Influence du temps de repos sur le courant de conduction du PMMA vieilli 8 heures.

D'après les figures IV.37 à IV.41, on constate que le PMMA reprend partiellement ses caractéristiques isolantes après un certain temps de repos (48 à 72h) dans un environnement sec.

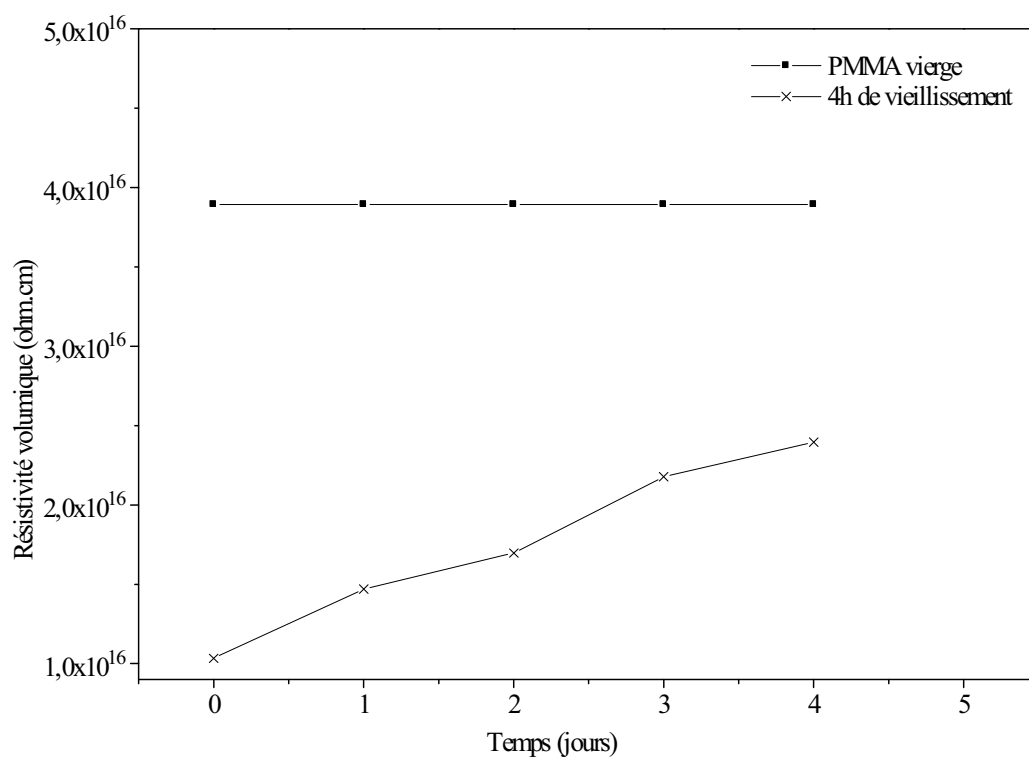
### G.2. Influence sur la résistivité volumique



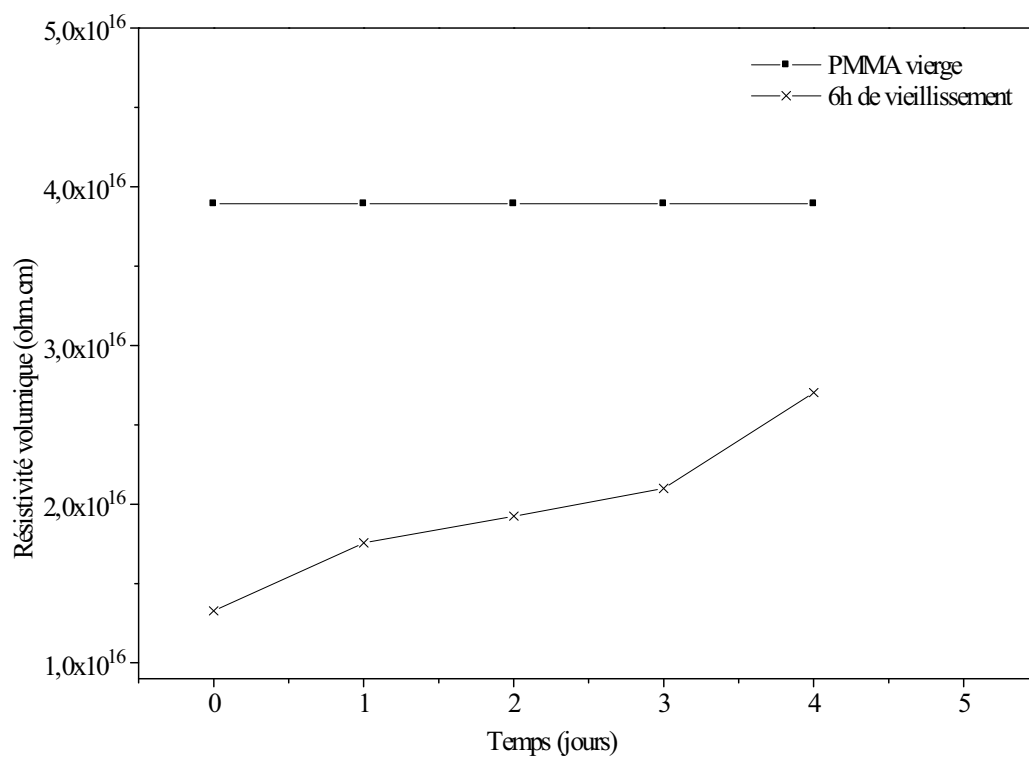
**Fig. IV.42** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PMMA vieilli 1 heure.



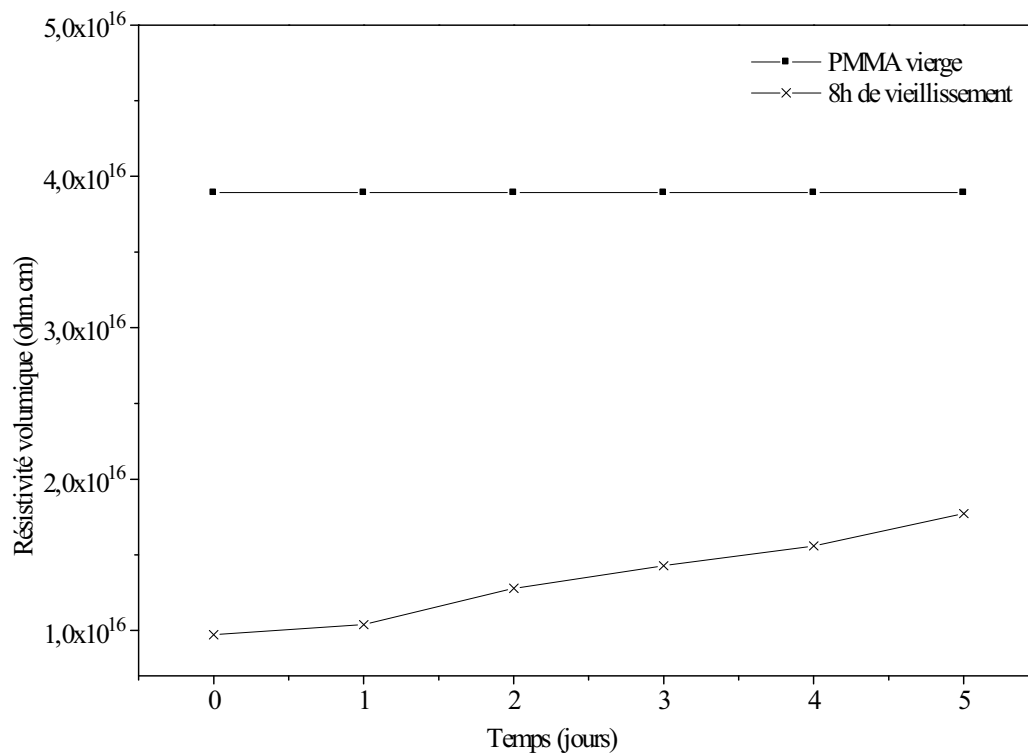
**Fig. IV.43** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PMMA vieilli 2 heures.



**Fig. IV.44** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PMMA vieilli 4 heures.



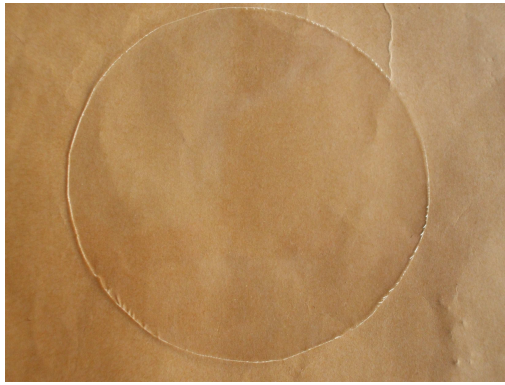
**Fig. IV.45** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PMMA vieilli 6 heures.



**Fig. IV.46** Influence du temps de repos sur la résistivité volumique du PMMA vieilli 8 heures.

#### IV.4.2.2. Observation visuelle

La surface des différents échantillons du PMMA est endommagée après vieillissement. On observe l'apparition d'une couche blanche sur la surface des échantillons vieillis sous l'effet de l'humidité. Cette dégradation est d'autant plus grande que le temps du vieillissement est grand [18], comme il est représenté sur la figure IV.47.



a. PMMA vierge



b. PMMA vieilli 4 heures



c. PMMA vieilli 6 heures



d. PMMA vieilli 8 heures.

**Fig. IV.47.** Photos de l'état de la surface du PMMA.

#### **IV.4. Conclusion**

Les différents résultats obtenus montrent que le courant de conduction dans les échantillons (PS et PMMA) en fonction du temps, augmente avec l'augmentation du temps de vieillissement et cette augmentation est d'autant plus importante que le temps de vieillissement est important. Ce résultat est confirmé par la mesure directe de la résistivité volumique.

Le temps de repos permet aux PS et le PMMA de reprendre une partie de leurs caractéristiques isolante au bout de quelques jours de repos dans un environnement sec.



*Conclusion*  
*Générale*

Le travail accompli, dans le cadre de ce mémoire avait pour objet l'étude théorique et expérimentale de l'influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique des polymères isolants (PS et PMMA) sous champs faibles et à température ambiante. Ceci nous a permis de comprendre d'une manière qualitative l'effet du vieillissement électrique sur les propriétés électriques des polymères utilisés dans l'isolation des dispositifs haute tension.

Les résultats pratiques obtenus, nous ont menés aux conclusions suivantes :

- Le courant de polarisation des deux polymères chute brusquement au bout de quelques dizaines de secondes et diminue lentement jusqu'à la stabilisation correspondant au courant permanent. Le courant de polarisation comprend la phase transitoire (courant d'absorption) et la phase stable (courant de conduction), la frontière entre les deux types de courant est située au environ de 1200s.
- Les courants de décharge sont mesurés après suppression du champ appliqué et court-circuitage de l'échantillon à travers l'électromètre. Ces courants sont opposés aux courants de charge, ils diminuent rapidement durant la première centaine de secondes avec une tendance vers une stabilisation au voisinage de zéro.
- Le vieillissement électrique entraîne l'augmentation de la conductivité électrique. Cette augmentation est d'autant plus importante que le temps de vieillissement est grand pour les deux polymères.
- Les deux polymères récupèrent partiellement leurs propriétés isolantes au bout de 48 heures à 72 heures de repos dans un environnement sec.

Nous espérons avoir fait œuvre utile en mettant à la disposition des étudiants ce modeste travail, et nous souhaitons que ce travail sera comblé par d'autres études théoriques et expérimentales.

*Références  
bibliographiques*

**[1] THEODORE WILDI et GILBERT SYBILLE,**

« Electrotechnique », Edition de boeck, 2005.

**[2] MICHEL AUGUET et MICHEL LANOZ**

« Traité d'électricité », Edition Corbaz, 2001.

**[3] CRISTIAN LAURANT**

« Diélectriques solides et charge d'espace », technique de l'ingénieur, pp 1-13.

**[4] JACQUE RAULT**

« Les polymères solides », Edition CEPADUES, 2002.

**[5] MICHEL FANTANILLE et YVES GNANOU**

« Chimie et physico-chimie des polymères », Edition DUNOD, 2005.

**[6]** <http://www.futura-sciences.com/fr/doc>.

**[7] MAURICE REYNE**

« Technologie des plastiques », Edition HERMES.

**[8] F.HADJEB, L.HAROUN et L.OUALLI**

« Etude de l'influence du vieillissement électrique du PMMA et du SAN », Mémoire d'ingénieur UMMTO, 2008.

**[9] MARC CARREGER**

« Matériaux polymères », Edition DUNOD, 2007.

**[10] ROLAND COELHO et BERNARD ALADENIZE**

« Les diélectriques : propriétés diélectriques des matériaux isolants », Edition HERMES, 1993.

**[11] YVAN SEGUI**

« Diélectriques », Techniques de l'ingénieur 2000, P. 1-12.

**[12] *H.BOUAZZA et L.MOUSLI***

« Etude de l'influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique du PP et du PS », mémoire d'ingénieur UMMTO, 2009.

**[13] *M.SAIDI***

« Contribution à l'étude de l'effet de la pression hydrostatique sur la conductivité du polyéthylène basse densité et du polystyrène », thèse magister, USTHB 1985.

**[14] *ROBERT FOURNIE***

« Les isolants en électrotechnique : concept et théorie », Edition EYROLLES, 1986.

**[15] *F. LOUNES***

« Contribution à l'étude du vieillissement électrique d'interfaces isolantes air-solide », mémoire d'ingénieur UMMTO, 2007.

**[16] *D.BOUGUEDAD***

« Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'EPDM », thèse magister, UMMTO 2002.

**[17]** <http://www.techniques-ingenieur.fr/book>.

**[18] *M.A.HANDALA et O. LAMROUS***

« Surface degradation of styrene acrylonitrile exposed to corona discharge », Euro. Trans. Electr. Power 2008 pp. 494 -505.

**[19] *M.CARREGA***

«Matériaux industriels, matériaux polymères », Edition DUNOD, 2000.

**[20] *H.H.KAUSCH, J.PLUMMER, N.HEYMANS et P.DECROLY***

« Traité des matériaux polymères », Edition GEODIF, 1999.

# Résumé

Dans le cadre de ce mémoire, on avait pour objet l'étude théorique et expérimentale de l'influence du vieillissement électrique sur la conduction électrique dans le polystyrène (PS) et le poly méthacrylate de méthyle (PMMA) sous champ faible et à température ambiante.

Nous avons consacré la première partie aux généralités sur les isolants solides et les différentes familles constituant les polymères, à la présentation des différentes lois qui régissent les mécanismes de la conduction électrique dans les polymères ainsi qu'à la présentation des différents types du vieillissement.

La deuxième partie est consacrée à la description des dispositifs expérimentaux, aux essais effectués ainsi qu'à la présentation des résultats et à leurs discussions.

D'où on a tiré les conclusions suivantes :

Le courant de polarisation des deux polymères chute brusquement au bout de quelques dizaines de secondes et diminue lentement jusqu'à la stabilisation correspondant au courant permanent. Le courant de polarisation comprend la phase transitoire (courant d'absorption) et la phase stable (courant de conduction), la frontière entre les deux types de courant est située au environ de 1200s.

Le vieillissement électrique entraîne l'augmentation de la conductivité électrique. Cette augmentation est d'autant plus importante que le temps de vieillissement est grand pour les deux polymères.

- Les deux polymères récupèrent partiellement leurs propriétés isolantes au bout de 48 heures à 72 heures de repos dans un environnement sec.