

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE
N° D'ORDRE: RES-03



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE: ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : Mebarka LOUNNAS

Zina MAOUCHE

Intitulé

**Etude et prédiction du comportement des propriétés
diélectriques d'un isolant solide sous contrainte
électrique par les réseaux de neurones**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Fayssal OUAGUENI	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. El Hadi BELHITECHE	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Dr. Hani ENGUESMIA	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co-Encadreur
Dr. Khaled BELHOUCHE	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année Universitaire: 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à présenter nos vifs remerciements, en premier lieu, au Dr E.BELHITECHE, pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant de nous encadrer, ses conseils précieux tant au niveau scientifique, technique et rédactionnel nous ont beaucoup aidé. Nous le remercions chaleureusement.

Nous exprimons nos sincères remerciements au Dr H.BENGUESMIA pour sa motivation et pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de ce travail.

Que les membres de jury trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Enfin, merci à toutes personnes qui ont contribué de pré ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Les câbles à isolation synthétique présentent des avantages non négligeables sur les plans technique et économique. Parmi ces avantages nous pouvons citer : la grande facilité de mise en œuvre des câbles, leur volume réduit, leur exploitation aisée et la non nécessité de leur entretien [1].

Outre ces qualités, ils ont de bonnes propriétés électriques et mécaniques ainsi qu'une durée de vie largement supérieure à celle des autres isolants.

Depuis des décennies, le polychlorure de vinyle (PVC) a été, et continue d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles, en raison de son faible coût. Cet excellent matériau d'isolation, utilisé généralement en haute tension, est caractérisé par une très bonne rigidité diélectrique et de faibles pertes diélectriques. Malgré les excellentes propriétés mécaniques et thermiques du PVC, qui permettent son utilisation sur une large échelle comme un isolant des câbles moyenne, son comportement électrique à haute tension et son caractère thermoplastique limitent assez cette utilisation surtout avec le développement de la nouvelle technologie des câbles 500 kV [2-4].

Une isolation électrique doit supporter, sans défaillance, des contraintes électriques, thermiques et chimiques pendant une durée de vie pouvant aller jusqu'à 40 ans [5]. Pour cela, les essais d'endurance thermique pour avoir une prévision de la durée de vie des matériaux sont recommandés. Ces essais sont destinés à déterminer les changements irréversibles d'importantes propriétés des matériaux isolants en fonction de la contrainte thermique et du temps de vieillissement.

L'objectif de notre travail est l'étude et prédiction du comportement du PVC soumis à un vieillissement électrique par les réseaux de neurones. Notre présent manuscrit s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une présentation des généralités sur le vieillissement des polymères, et leur classification.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons les réseaux de neurones artificiels. Nous présenterons le matériau et expliquerons les techniques expérimentales utilisées dans le troisième chapitre.

Le dernier chapitre est réservé à l'interprétation des résultats obtenus dans la partie expérimentale. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

I.1. Introduction

La CEI et l'IEEE définissent le vieillissement des isolants solides ou des systèmes d'isolation comme tout changement irréversible des propriétés des matériaux isolants. Ces changements affecteront considérablement les performances de l'isolation et réduiront sa durée de vie. En raison de la complexité de la composition chimique des matériaux, le terme vieillissement n'implique pas de mécanisme précis. Le degré de vieillissement des matériaux isolants dépend des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et de la durée de la contrainte appliquée, ainsi que du processus et du traitement dans le processus de fabrication. Le processus de vieillissement ou de dégradation des isolants solides fait généralement intervenir des facteurs internes (transformations chimiques et physiques des matériaux, charges spatiales captées, etc.) et des facteurs externes (cavitation, pollution et impuretés, hétérogénéité, etc.). Les principaux facteurs externes des câbles à isolation synthétique sont :

- **Cavités gazeuses** : elles existent dans l'isolant lui-même ou à l'interface isolant /écran semi-conducteur si un champ électrique (l'une de ses contraintes qui se produit pendant le fonctionnement du câble) traverse la cavité et dépasse la rigidité du gaz contenu dans la cavité, une décharge partielle peut se produire. Si la décharge est suffisamment forte, elle provoquera une dégradation continue de l'isolation et peut former un arbre électrique, endommageant ainsi l'isolation électrique.
- **Contaminations et impuretés** : les impuretés sont généralement dispersées dans le matériau isolant sous forme de particules conductrices ou non. On les retrouve également en grand nombre dans les écrans semi-conducteurs et les interfaces isolant/semi-conducteur. La présence de ces impuretés va augmenter le champ électrique local (la différence de constante diélectrique entre les deux milieux) et produire des arbres électriques.
- **Autres charges additives** : la non uniformité de la dispersion des charges additives, comme les antioxydants ou les charges renforçantes, présente une classe de facteurs extrinsèques du vieillissement. Les facteurs intrinsèques sont associés à la structure du matériau lui-même. Ils se présentent sous forme :
 - de changements chimiques comme l'oxydation et l'hydrolyse.
 - de changements physiques telles la recristallisation et cristallisation secondaire.
- **de transport et piégeage** : les pièges de charge existent dans les matériaux isolants sous la forme d'atomes d'impuretés, de défauts physiques et de groupes carbonyle formés lors de l'oxydation des matériaux Fukuda et al ont souligné que dans le cas des câbles isolés extrudés (isolés par du polyéthylène et du polyéthylène réticulé chimiquement), les facteurs externes sont souvent les principaux facteurs de dégradation de l'isolation conjointement aux facteurs cités précédemment, la présence du champ électrique, de la température, de la contrainte mécanique et les agressions de l'environnement au cours du fonctionnement des câbles à isolation synthétique, contribuent à la dégradation du matériau isolant. Dans ce chapitre nous nous intéressons aux interactions entre les différents facteurs de vieillissement : d'une part la contrainte thermique (vieillessement thermique), d'autre part la contrainte électrique (vieillessement électrique), qui constituent les deux plus importants facteurs de dégradation des câbles électriques [6].

I.2. Vieillissement thermique

I.2.1. Vieillissement physique

Le processus physique lié au vieillissement thermique découle des faits suivant [7] :

- modification de la configuration spatiale macromoléculaire.
- pénétration de solvants et migration d'adjuvants.
- fissuration sous contrainte en milieu tensioactif.

I.2.1.1. Modification de la morphologie

Le vieillissement physique interne est uniquement lié aux causes internes du matériau (mobilité moléculaire), c'est-à-dire en fin d'utilisation du matériau, dans un état thermodynamiquement instable. Le vieillissement corporel est associé à mouvement moléculaire, plus la température ne peut être prédite rapidement élevée, et d'autant plus que l'historique thermique en fin de mise en œuvre fera le matériau atteint un état stable.

Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la compacité du réseau macromoléculaire, c'est-à-dire par une réduction du volume libre (volume disponible par les mouvements de segments de macromolécules). La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue et le facteur de pertes diélectriques diminue. [6]

I.2.1.2. Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif

Dans le milieu tensioactif, le polymère est la partie la plus facile à craquer la limite dépend de la qualité du polymère, Phénomène de fissuration et le développement de la tension superficielle à l'interface polymère-liquide. Cela dépend de Plusieurs paramètres, à savoir la contrainte mécanique, la température et l'activité de tension, la viscosité du liquide qui détermine la vitesse de pénétration dans la fissure [8].

I.2.1.3. Chocs thermiques

Lors du changement brusque de température du matériau isolant organique, le gradient de température augmente dans l'épaisseur du matériau, où se produisent différentes dilatations. Le choc thermique peut provoquer une rupture mécanique [8].

I.2.1.4. Phénomènes de transport

L'essence du phénomène de transfert de masse fait appel à Dissoudre, diffuser et plastifier. Nombre de petites molécules possibles Précipitant dans le réseau macromoléculaire, c'est-à-dire leur solubilité dans le polymère, Selon le nombre de sites portés par la macromolécule, des interactions peuvent s'établir. Ces interactions sont essentiellement déterminées par la polarité électrique des groupes présents. C'est pourquoi les polymères à faible polarité ont peu ou pas d'affinité avec la plupart des solvants [6]. Selon qu'il y a un transfert de masse du matériau vers l'environnement, et vice versa, une pénétration de solvant ou une perte d'additif peut se produire

I.2.1.5. Pénétration de solvants

Si une espèce de faible masse moléculaire (vapeur, liquide) se rencontre dans l'environnement

et présente une solubilité non nulle, on constate qu'elle va pénétrer dans le polymère. Le solvant le plus courant est évidemment l'eau, qui peut poser des problèmes parce que les matériaux ne sont pas totalement hydrophobes [9]. Le solvant pénètre dans le polymère selon une loi de diffusion qui peut varier selon le cas étudié. Deux cas se présentent:

Le solvant n'induit pas de modification de la structure du polymère : sa concentration tend vers une limite correspondant à la saturation (limite de la solubilité), qui dépend dans le cas d'un environnement gazeux, de la pression partielle du solvant dans l'atmosphère.

Le solvant induit une modification de la structure du polymère ou de sa morphologie (fissuration liée à un gonflement différentiel) : dans ce cas, on peut observer une variation continue de la concentration en solvant.

La pénétration du solvant dans un polymère est influencée par les facteurs suivants :

-La structure chimique du motif structural élémentaire : c'est elle qui détermine essentiellement l'affinité du polymère pour le solvant considéré.

La morphologie : les zones cristallines peuvent être considérées comme imperméables. La solubilité globale décroît donc avec le taux de cristallinité. Dans les polymères amorphes, l'état de gélification, qui détermine la compacité du réseau macromoléculaire, joue également un rôle important.

- Le taux de réticulation : la pénétration de solvant est d'autant plus aisée que le taux de réticulation est faible. Cette pénétration a pour conséquences, la plastification qui se traduit par une diminution du module d'élasticité, de la contrainte à la rupture, une augmentation de l'allongement à la rupture et la diminution de la température de transition vitreuse [6].

En effet, dans le cas de l'eau, on estime que 1% d'eau diminue cette température de l'ordre de 10 à 20°C (ramollissement du polymère) [9].

I.2.1.6. Perte d'adjuvants

Les polymères contiennent généralement des substances organiques de faible masse moléculaire. Sous l'influence de la température, les substances peuvent migrer hors du matériau plus au moins lentement. La perte de plastifiant due à la migration peut impliquer des quantités relativement importantes, Par conséquent affecter de manière significative les propriétés du matériau (en particulier les propriétés mécaniques). La mobilité du plastifiant est inversement proportionnelle à sa tension de vapeur, c'est-à-dire elle est liée dans une certaine mesure à la masse moléculaire. Pour les plastifiants, on observera une diminution de l'allongement à la rupture, La température de transition vitreuse et le module d'Young augmentent. Dans ces « circonstances Stabilisant, la stabilité chimique sera réduite. Plusieurs mécanismes sont responsables de la migration des adjuvants ; on peut citer l'évaporation et l'extraction [8].

I.2.1.7.L'évaporation

Les molécules du plastifiant se trouvant à la surface peuvent passer dans l'atmosphère, d'où l'existence d'un gradient de concentration dans l'épaisseur du matériau. L'apparition de ce gradient entraîne la diffusion du plastifiant de l'intérieur vers la surface. Le mécanisme entraîne la disparition progressive du plastifiant. Lorsque les adjuvants sont de petites molécules, ils sont susceptibles de s'évaporer et de migrer rapidement hors du polymère. La

capacité d'évaporation du plastifiant est intimement liée au poids moléculaire de ce dernier.

La solubilité des adjuvants dans les polymères constitue un facteur important. La masse molaire de l'adjuvant joue également un rôle majeur dans le phénomène de l'évaporation. En effet, la vitesse de migration et d'évaporation augmente lorsque la masse molaire diminue. La vitesse de perte de plastifiant dépend essentiellement de l'épaisseur du matériau (la vitesse est inversement proportionnelle à l'épaisseur), de la température (la vitesse augmente quand la température augmente), du confinement de l'atmosphère (la vitesse augmente quand le confinement diminue) et de la structure du plastifiant. Le phénomène d'évaporation entraîne également une perte de masse [10].

I.2.1.8.L'extraction

Dans le cas d'un contact entre le polymère et le milieu liquide, le phénomène d'extraction doit être pris en compte. Ici, la stabilité de l'additif dans le liquide peut jouer le rôle le plus important, et dans tous les cas est le premier paramètre à considérer lors du choix d'un matériau [11].

I.3. Vieillessement chimique

Le vieillissement chimique désigne tout phénomène dans lequel les matériaux sont chimiquement modifiés sous l'influence de l'environnement. En pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent au vieillissement physique, et ces deux phénomènes interfèrent entre eux [8]. Les processus chimiques impliqués dans la dégradation des polymères sont variés, bien sûr en fonction de la nature de l'isolant lui-même. Cependant, certains La principale forme de détérioration a été trouvée dans la plupart des cas.

I.3.1.Oxydation

Il est reconnu depuis longtemps que la principale cause de dégradation est l'oxygène, qui attaque la chaîne hydrocarbonée du polymère et provoque une rupture ou au contraire une approbation parasitaire [12]. Ce processus d'oxydation est très lent et conduit à la formation de produits acides, ce qui augmente la conductivité et la scission de la chaîne. Responsable de la réduction de la charge de rupture [13].

L'oxydation est une réaction en chaîne initiée par la rupture des liaisons radicalaires libre. Cela conduira à l'accumulation de groupes tels que OH et CO. Oxydant Le matériau dépend de la solubilité et du taux de diffusion de l'oxygène dans le matériau, Mais le plus important est la quantité, la qualité et la répartition des antioxydants incorporés [14]. La dégradation oxydative thermique des polymères est principalement causée par la formation de chaînes et de groupes polaires tels que les cétones, les aldéhydes, les alcools et les acides. La scission de chaîne réduit la viscosité du polymère et les groupes polaires favorisent le transfert des porteurs de charge. L'oxydation a pour effet d'introduire des dipôles électriques dans les macromolécules, entraînant une augmentation du facteur de perte diélectrique et une diminution de la rigidité diélectrique du matériau polymère. Le processus d'oxydation des polymères peut avoir d'autres conséquences : on peut citer l'apparition de la bande d'absorption diélectrique (augmentation des pertes) et la diminution du seuil de température, au-delà duquel la dégradation commence. La cinétique d'oxydation est généralement caractérisée par la présence d'un temps d'induction, pendant lequel la propriété change peu. Le temps d'induction augmente avec les performances du système antioxydant [15]. Stabilité à l'oxydation : Evaluation du temps d'induction d'oxydation de matériaux polymères.

L'activation de l'oxydation thermique varie linéairement avec l'antioxydant contenu dans le matériau.

I.3.2. Réticulation

Le processus de réticulation est caractérisé par la formation de ponts covalents entre des segments de chaîne adjacents, ce qui réduit la flexibilité et l'extensibilité du matériau isolant, le rendant ainsi cassant. Dans le cas de polymères linéaires à vitesse de réticulation modérée, la réticulation conduit à l'apparition de plus de ramifications et de poids moléculaires plus élevés que la chaîne initiale. Le polymère perd partiellement sa solubilité dans les polymères à taux de réticulation élevé dans le cas des polymères tridimensionnels, la réticulation se traduit par une augmentation de la concentration en neuds de réseau (diminution de la masse moyenne).

Elle s'accompagne d'une diminution du taux de gonflement et d'une augmentation de la température, de la transition vitreuse T_v et du module d'élasticité. À l'exception de la diminution de la solubilité, les propriétés physiques du matériau ont peu d'effet. En termes de propriétés mécaniques, la réticulation conduit à une augmentation du module d'élasticité, de la contrainte de rupture et de la température de ramollissement. Dans le cas de polymères initialement linéaires, une réticulation modérée peut également conduire à une augmentation de l'allongement à la rupture. Dans le cas d'un vieillissement réel, la réticulation s'accompagne presque toujours d'une coupure de chaîne.

- En fait, de nombreux polymères tridimensionnels peuvent être coupés en même temps En cas de vieillissement thermique des chaînes et des réticulations. Ensuite, leurs propriétés évolueront en fonction des pièces utilisées dans chaque procédé. La représentation de processus de réticulation des polymères tridimensionnels est mesuré en les mesurant Taux de réticulation ou quantité physique (T_v) qui lui est liée. [8]

I.3.3. Dépolymérisation

La dépolymérisation est un cas particulier des réactions de clivage de chaîne. La scission de chaîne créera un site actif, ce qui rendra instables les liaisons monomères adjacentes et entraînera l'élimination continue des molécules de monomère. La dépolymérisation est d'autant plus facile que l'énergie de liaison monomère-monomère est faible. Elle est intervenue en quelque sorte plus ou moins important dans divers types de dégradation. Les phénomènes impliqués et Les relations qui les régissent sont très proches de celles liées polymérisation. Le mécanisme de dépolymérisation fait intervenir plusieurs réactions; Nous les énumérons selon leur ordre de déroulement : amorçage, dépropagation, transfert et terminaison [16].

- La dépolymérisation entraîne l'élimination des fragments moléculaires (monomères) et une très petite et rapide réduction du poids moléculaire. La réaction de dépolymérisation peut se produire même en l'absence d'oxygène. L'évaporation des produits de pyrolyse de plus faible poids moléculaire a une double conséquence. D'une part, c'est le retrait de la matière. D'autre part, c'est la formation de produits volatils, qui sont facilement à l'origine de bulles. Ils sont aussi responsable des décharges partielles dans l'isolation haute tension.

I.3.4. Coupure de chaînes statistiques

L'interruption du canal de statistiques se produit sur les sites ainsi distribués aléatoire dans les réseaux macromoléculaires. Divers mécanismes chimiques peuvent être la cause de ruptures de chaînes statistiques, telles que l'hydrolyse [12].

Il est généralement admis que la dégradation des polymères commence toujours par la rupture de la liaison. Cette diminution est due à l'apport d'énergie (chimique, mécanique, photochimique ou radiochimique, chaleur) à la macromolécule ; lorsque cette énergie est concentrée sur une liaison et qu'elle est supérieure à l'énergie de liaison, la rupture est effective. Le mécanisme de scission statistique de chaîne dans les polymères implique le concept de stabilité thermique. En effet, il existe une corrélation entre l'énergie de dissociation de la liaison et la stabilité thermique du polymère (la stabilité est déterminée par la liaison la plus faible). Par conséquent, L'énergie de la liaison la plus faible détermine donc dans une large mesure la stabilité globale [6].

I.4. Vieillessement électrique

La caractéristique du vieillissement électrique est la dégradation des propriétés diélectriques du matériau sous l'action à long terme de contraintes électriques relativement élevées (champ électrique). Elle se caractérise par une augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité latérale du matériau. La présence de différentes sortes d'impuretés aggrave particulièrement la dégradation, notamment la cavitation gazeuse dans le diélectrique. Ces impuretés font généralement partie d'une décharge partielle, ce qui provoquera la corrosion du matériau après une période de temps relativement longue, et finira par conduire à un claquage diélectrique. [17]

I.4.1. Scénario standard du vieillissement

Le but de cette partie est de montrer une série de mécanismes possibles depuis la mise en service de l'isolant organique jusqu'à la rupture de ce dernier de façon très succincte. La figure I.1 montre une situation possible du phénomène de vieillissement : l'isolant organique en début d'utilisation ($t = 0$ sur la figure I.1) peut présenter ou non des défauts initiaux (cavités, trous, etc.). Lorsque la tension est appliquée, des vacuoles se développent ou apparaissent dans l'isolation ($t = t_1$ jusqu'à t_2). Ce phénomène est le vieillissement électrique. Si la décharge provient de la vacuole ($t = t_3$) et forme une structure arborescente ($t = t_4$), elle entraînera une dégradation des performances. Cette dégradation peut provoquer la rupture de l'isolant en fin de vie ($t = t_5$). [18]

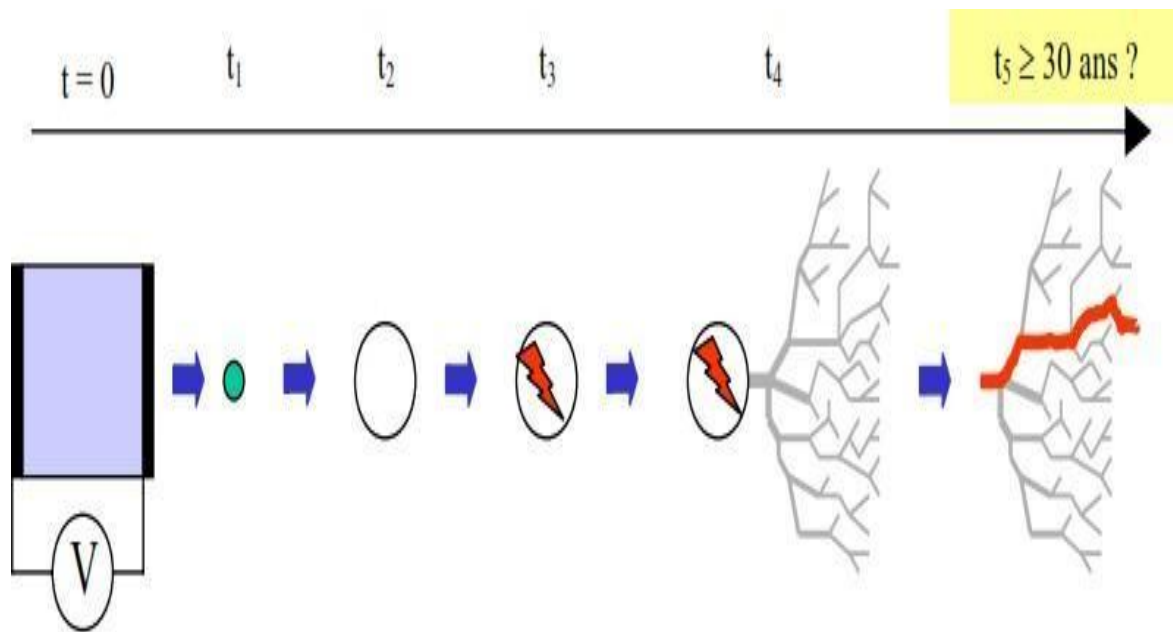


Figure I.1 : Schéma représentant le scénario standard de vieillissement [18].

I.4.2. Facteurs essentiels du vieillissement électrique des polymères

I.4.2. 1. Arborescence électrique

L'arborescence électrique est la concentration locale du champ causée par la rugosité du métal ou des éléments de pollution. Dissado et Fothergill ont identifié trois sous-catégories d'arbres électriques : L'arborescence ramifiés, les arbustes et un mélange des deux : les arbres densément ramifiés. Les images de ces trois arbres sont présentées à la figure I.2.

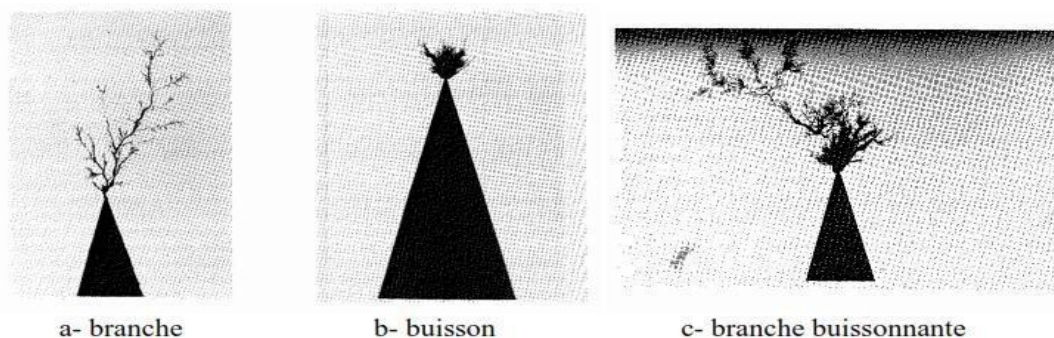


Figure I.2 : Les trois sous catégories de l'arborescence électrique [19]

Le diamètre du tronc des arbres dendritiques est d'environ $30 \mu\text{m}$ et le diamètre des branches est d'environ $1 \mu\text{m}$. Les arbres en forme d'arbuste forment des tubes creux à haute densité. Pour les arbres à branches épaisses, ils ont les mêmes caractéristiques. Des études ont montré

que l'importance de l'amplitude du champ électrique sur la forme des arbres dépend aussi de la fréquence du signal électrique, de la forme de l'électrode et du type de matériau utilisé.

I.4.2. 2. Charges d'espace

Si l'isolant a une pureté parfaite et que la seule source de charge interne est constituée par les atomes du réseau cristallin, alors l'isolant est parfait. En réalité, il n'y a pas d'isolant parfait, et leur conductivité est souvent très faible, principalement en raison de la structure de l'isolant et de l'existence de sources de charges autres que les atomes dans le réseau cristallin. Ainsi, lorsque le diélectrique est soumis à différentes contraintes, on peut observer des charges excessives dans certaines zones du matériau, que l'on appelle charges d'espace. La charge d'espace est le facteur principal dans le comportement diélectrique d'un isolant (la fiabilité sous haute tension, le facteur de perte diélectrique est fonction de la température et de la fréquence). Depuis des décennies, de nombreuses études se sont penchées sur le rôle de la charge d'espace dans le vieillissement diélectrique des isolants. [20]

I.4.2. 2. 1. Origine de la charge d'espace

Selon les mécanismes de génération, les charges d'espace sont classées en plusieurs types comme illustré à la Figure I.3, ces différents mécanismes sont :

Dipôles : d'orientation et de déformation.

Les porteurs ioniques : peuvent être générés à partir des électrodes. Ils peuvent résulter, soit de la diffusion vers l'isolant d'impuretés ionisables à partir d'électrodes non métalliques, soit de l'hydrolyse de l'eau présente sous forme de vapeur en surface des électrodes.

- **Electro-dissociation** : Une espèce initialement neutre d'un point de vue électrique se dissocie en des espèces chargées sous l'action d'un champ électrique. Dans ce cas, les porteurs de charge résultent, soit de la dissociation de la molécule de l'isolant elle-même, soit des additifs et impuretés qui peuvent se dissocier, éventuellement suite à des réactions électrolytiques.

Interaction : Les charges d'espaces se forment aussi sous l'action d'interaction de l'isolant avec des rayonnements ionisants (UV, X et γ) ou avec des particules énergétiques.

Injection d'électrons : La génération des charges d'espace peut avoir lieu aux interfaces métal

– isolant. C'est le cas d'une injection des porteurs électroniques. En effet, l'électron peut franchir la barrière métal-isolant par deux mécanismes, effet Schottky et effet Fowler-Nordheim. Il faut également noter que les mécanismes cités ci-dessus n'interviennent qu'en présence d'un champ électrique et/ou de la température.

- **Charges images** : En réponse aux autres charges d'espaces décharges électriques, souvent inévitables dans un grand nombre de dispositifs du génie électrique, sont aussi des sources de particules chargées.

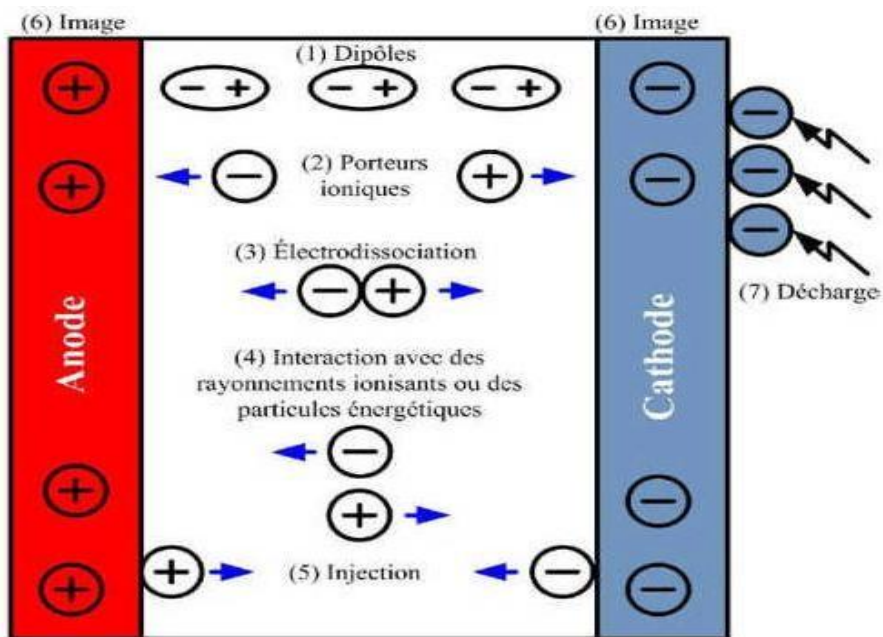


Figure I.3 : Différents mécanismes de génération des charges d'espace [21]

I.4.2. 2.2. Effet de la charge d'espace sur le vieillissement électrique

Les études effectuées ces dernières années ont montré la contribution directe de la charge d'espace au phénomène de vieillissement électrique du matériau polymère. Disado, Mazzanti et Montanari décrivent l'influence des charges d'espace sur le vieillissement comme suit :

En considérant qu'un matériau polymère est constitué de sites réactionnels, chimiques ou morphologiques, soumis à une réaction locale, l'isolant arrive en fin de vie lorsqu'une quantité critique de sites est passée de l'état initial à l'état final. Ces états sont représentés respectivement en 1 et 2 sur la figure I.4. A l'issue de la fabrication, la quasi-totalité des sites est dans l'état 1 puis l'équilibre thermodynamique tend à s'établir. Si, à l'équilibre, la quantité critique de sites à

l'état 2 n'est pas atteinte, l'isolant a une durée de vie qui n'est pas affectée par la contrainte.

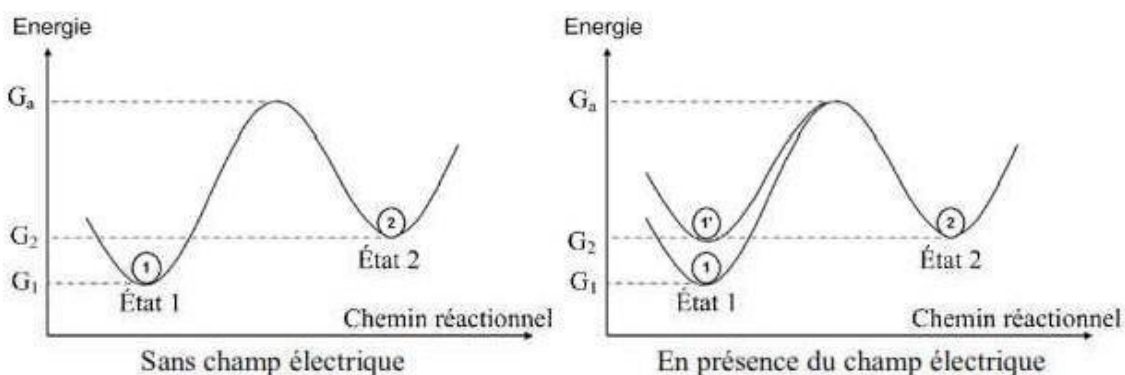


Figure I.4 : Diagramme d'énergie des "sites réactionnels"

Lorsque le matériau est soumis à un champ électrique, des charges sont injectées dans le matériau pour atteindre une densité stable à plus ou moins long terme. L'effet de la charge d'espace sur ce modèle est double :

L'énergie électrostatique générée par la présence de charge électrique augmente l'énergie du site de réaction. Cependant, tous les états (1 et 2) sont affectés par ce gain d'énergie, et l'équilibre n'a pas changé. Cependant, le processus de vieillissement se produit par une réaction chimique avec la charge injectée.

L'existence d'une charge d'espace provoque des contraintes mécaniques dans le matériau. L'énergie mécanique mise en jeu peut alors être absorbée par les sites réactionnels à l'état 1, facilitant ainsi le passage à l'état 2 (Figure I.4.b). Des contraintes mécaniques résiduelles peuvent être à l'origine de la défaillance, et l'existence de la défaillance est fatale au matériau isolant (fissures, cavitation). [20]

I.4.2.3. Décharge partielle et cavité

Les systèmes d'isolation en polymère contiennent généralement des microcavités dans le processus de fabrication. Dans un champ extérieur, lorsque la cavité est suffisamment grande (quelques dizaines de microns au champ typique et à la température de fonctionnement, une décharge apparaîtra dans le gaz. Ce type de décharge est appelé décharge partielle car il ne limite pas la propagation de l'ensemble de la décharge, soit parce que le champ électrique est insuffisant pour provoquer une propagation complète, soit parce qu'il est bloqué par un isolant avec un champ de claquage plus élevé. Concernant le mécanisme de décharge, la différence de constante diélectrique entre le gaz et le polymère peut augmenter le champ dans le gaz, mais un électron initial est nécessaire pour initier la décharge. La source de charge préférée est la conduction de porteurs (électrons primaires) transportés à l'intérieur du polymère et piégés sous forme de charges spatiales à l'interface polymère-cavité. Par l'ionisation des molécules de gaz sous champ appliqué, une avalanche électronique apparaît, s'accompagnant de dégradations du matériau à travers des processus thermiques (carbonisation), chimiques (action de l'ozone ou de l'acide nitrique produits dans la décharge) et électrochimiques (bombardement par des particules chargées). Une telle analyse du phénomène a été élaborée par Montanari, Mazzanti et Serra afin de construire un modèle de vieillissement dû aux décharges partielles. L'activité de décharge partielle à partir de vacuoles produit également une érosion des parois de la cavité, une croissance de la cavité et éventuellement le développement d'arborescence si les contraintes électriques sont suffisantes. Ainsi pour s'affranchir des arborescences, il faut donc ne pas avoir de vacuoles initiatrices de décharges partielles. La question de l'origine et de la croissance éventuelle des vacuoles est donc posée : préexistence ou formation sous contrainte électromécanique.

Décharges de surface : en ce qui concerne les phénomènes de surface de l'isolant, les décharges ou les contournements résultant de la pollution de celle-ci provoquent une augmentation de la conductivité de surface, et donc une diminution de la résistance superficielle [20].

I.5. Rupture diélectrique mécanisme de claquage

La rupture ou le claquage des isolants peut se produire selon différents mécanismes dont quatre sont souvent évoqués, à savoir :

I.5.1. Claquage thermique

Ce phénomène est dû à une augmentation de la conductivité électrique du matériau, généralement due à la température. Une augmentation de la température du diélectrique entraîne une augmentation de la densité de courant, ce qui entraîne des pertes, qui à leur tour entraînent un échauffement supplémentaire. L'augmentation de la conductivité et une dissipation thermique insuffisante conduisent à un emballement thermique. Ce phénomène a été observé dans les films de condensateurs qui subissent des champs continus très élevés.

I.5.2. Claquage électromécanique

Ce mécanisme est dû à la pression électrostatique exercée par les électrodes sur l'isolant. Si cette pression est trop importante, l'épaisseur de la couche isolante va diminuer, augmentant ainsi le champ électrique. Si la pression appliquée est supérieure à la résistance à la compression, une rupture se produira, la température augmentera et le chauffage du matériau provoquera le développement de cet effet. De tels dommages sont très rares dans les systèmes électriques.

I.5.3. Claquage électrique

Un claquage électronique est susceptible de se produire dans des champs très élevés. Seul le champ électrique est déterminant. Plusieurs théories ont été proposées dans lesquelles les concepts de fracture inhérente et de fracture par avalanche sont généralement distingués.

Dans la rupture intrinsèque, on considère que la seule source d'électrons est la bande de valence de l'isolant. La rupture par émission de champ selon Zener exprime la probabilité (λ) de passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction par une expression de type Fowler–Nordheim : [6]

$$\lambda = \frac{q \cdot E}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot m \cdot a \cdot E_i}{h^2 \cdot q \cdot E}\right) \quad (\text{I.1})$$

La caractéristique du claquage par décharge est l'apparition et la propagation d'arbres électriques. Du fait d'un défaut dans l'isolant ou sur l'électrode, une structure arborescente se crée dans la cavité ou au niveau du renforcement local du champ électrique. Le courant impulsionnel correspondant à la décharge partielle, notamment l'avalanche d'électrons dans le trou en phase gazeuse, peut dégrader le matériau. Former une structure filamenteuse ramifiée composée de micro canaux : arbre électrique (Figure I.5). La propagation et la modélisation des arbres électriques ont fait l'objet de nombreux travaux. Les plus récents sont Dissado et Champion, mais la recherche a résolu ce phénomène dans les années 1980 [22].



Figure I.5 : Exemple d'une arborescence électrique [23].

I.6. Lois de vieillissement électrique

I.6.1. Méthodes d'étude du vieillissement électrique

L'étude du vieillissement électrique des isolants électriques consiste à définir et caractériser les propriétés qui évoluent en fonction du temps de vieillissement sous champ électrique.

La définition des conditions de vieillissement représentatives est donc nécessaire dans un premier temps.

I.6.2. Conditions de vieillissement

Tout Comme pour le vieillissement thermique où d'une manière générale une température supérieure à la température de transition vitreuse doit être utilisée, les conditions de vieillissement électrique sont déterminées à partir de la valeur initiale (sur un matériau non vieilli) de la rigidité diélectrique.

Par exemple, Sandrolini [23] dans une étude sur une résine époxy de type DGEBA utilise des champs tels que :

$$0.18 \leq \frac{E}{E_{S0}} \leq 0.41 \quad (I.2)$$

Avec :

E le champ appliqué lors du vieillissement

$E.S_0$ la rigidité diélectrique initiale.

I.6.3. Caractérisation de la propriété fonctionnelle du matériau

Les conditions de vieillissement électrique sont déterminées en fonction de la méthode de caractérisation choisie. En effet, le matériau peut être caractérisé soit par un délai avant rupture à contrainte électrique constante (endurance), soit par mesure de la rigidité après vieillissement (rampe rapide). Ces méthodes sont des méthodes destructives et caractérisent la rupture de l'isolation.

La durée avant le claquage, appelée retard au claquage, est alors obtenue comme durée de vie. D'autres propriétés peuvent être étudiées comme la rigidité diélectrique, ou l'apparition des décharges partielles. La difficulté dans ce type d'études est la nature aléatoire des événements. Il est donc nécessaire de réaliser les essais sur un grand nombre d'échantillons et de faire appel à une interprétation statistique, généralement par la statistique de Weibull à 2 ou 3 paramètres. De plus, il s'agit généralement de vieillissements accélérés, dont la durée doit être adaptée à l'étude mais doit rester réaliste quant aux conditions d'utilisation dans les applications.[24]

I.7. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les deux types de vieillissement : vieillissement thermique et vieillissement électrique. Nous avons constaté que le vieillissement thermique des isolants solides fait intervenir un vieillissement physique et chimique. Ensuite nous avons donné le schéma standard qui représente le scénario du vieillissement électrique des polymères, et enfin, nous avons cité les différents facteurs qui conduisent à la dégradation des polymères sous champs électrique. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les généralités sur les réseaux de neurones.

II.1. Introduction

Lors de l'émergence d'une nouvelle technique, l'ingénieur se demande naturellement en quoi elle peut lui être utile. S'elle est dotée d'un nom plus métaphorique que scientifique, ce qui est évidemment le cas pour les réseaux de neurones artificiel (RNA), dont le nom est lié fortement à la biologie.

Les RNA sont maintenant couramment utilisés dans les domaines techniques tels que, fabrication, contrôle de la qualité, détection des fraudes, prédiction et estimation afin de réduire le temps de calcul.

Par conséquent, les RNA constituent une technique d'approximation des systèmes complexes, qui sont difficiles à modéliser par les méthodes statistiques classiques. C'est un algorithme d'apprentissage adapté au Perceptron Multi Couches.[25]

Dans les sections suivantes traite des concepts fondamentaux des réseaux de neurones et de leurs applications, en commençant par une simple introduction au modèle biologique d'un neurone, et comment il a inspiré le modèle mathématique du perceptron. À la fin de ce chapitre, il y a une explication des modèles de réseaux et leur apprentissage, leurs avantages et inconvénients.

II.2. Réseaux de neurones

Un réseau de neurones artificiel est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones.

Un réseau de neurones est constitué d'un très grand nombre de petites unités de traitement identiques appelées neurones artificiels.

Chacun de ces neurones est par ailleurs fort complexe. Essentiellement, il s'agit de tissu vivant et de chimie. Les spécialistes des neurones biologiques commencent à peine à comprendre quelques-uns de leurs mécanismes internes. On croit en général que leurs différentes fonctions neuronales, y compris celles de la mémoire, sont stockées au niveau des connexions (synapses) entre les neurones. C'est ce genre de théories qui a inspiré la plupart des architectures de réseaux de neurones. L'apprentissage consiste alors soit à établir de nouvelles connexions, soit à en modifier des existantes [26].

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation du neurone biologique par Warren McCulloch et Walter Pitts [27]. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat

d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés.

II.3. Neurone biologique

Le neurone biologique possède trois principales composantes : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone (voir Figure II.1). Les dendrites forment un maillage de récepteurs nerveux qui permettent d'acheminer vers le corps du neurone des signaux électriques en provenance d'autres neurones. Celui-ci agit comme une espèce d'intégrateur en accumulant des charges électriques. Lorsque le neurone devient suffisamment excité (lorsque la charge accumulée dépasse un certain seuil), par un processus électrochimique, il engendre un potentiel électrique qui se propage à travers son axone pour éventuellement venir exciter d'autres neurones.

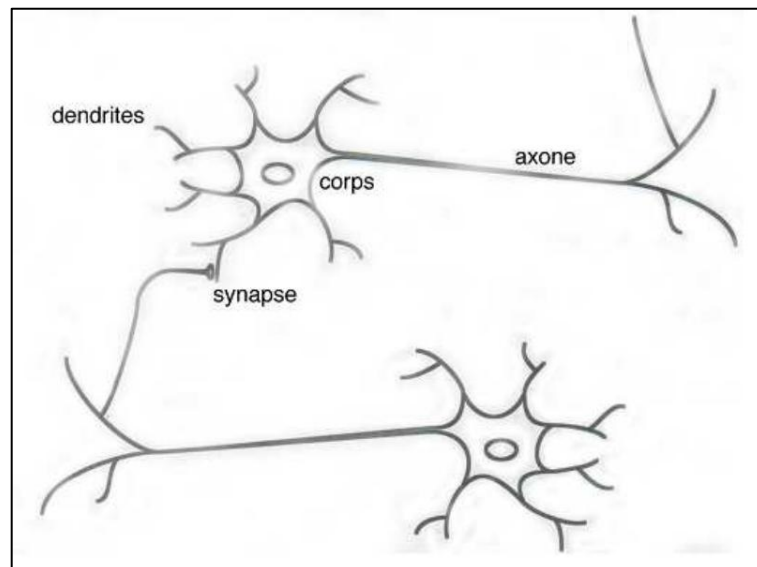


Figure II.1 Schéma représentatif de la structure du neurone.

Le point de contact entre l'axone d'un neurone et le dendrite d'un autre neurone s'appelle la synapse. Il semble que c'est l'arrangement spatial des neurones et de leur axone, ainsi que la qualité des connexions synaptiques individuelles qui détermine la fonction précise d'un réseau de neurones biologique. C'est en se basant sur ces connaissances que le modèle mathématique décrit ci-dessus a été défini.[28]

Un poids d'un neurone artificiel représente donc l'efficacité d'une connexion synaptique. Un poids négatif vient inhiber une entrée, alors qu'un poids positif vient l'accroître. Il importe de

retenir que ceci est une grossière approximation d'une véritable synapse qui résulte en fait d'un processus chimique très complexe et dépendant de nombreux facteurs extérieurs encore mal connus.

En plus, pour pouvoir simuler un réseau de neurones, on doit rendre le temps discret dans les équations. Autrement dit, on doit supposer que tous les neurones sont synchrones, c'est-à-dire qu'à chaque temps t , ils vont simultanément calculer leur somme pondérée et produire une sortie.

Dans les réseaux biologiques, tous les neurones sont en fait asynchrones. En ajoutant une fonction d'activation au modèle précédent, on obtient le modèle suivant :

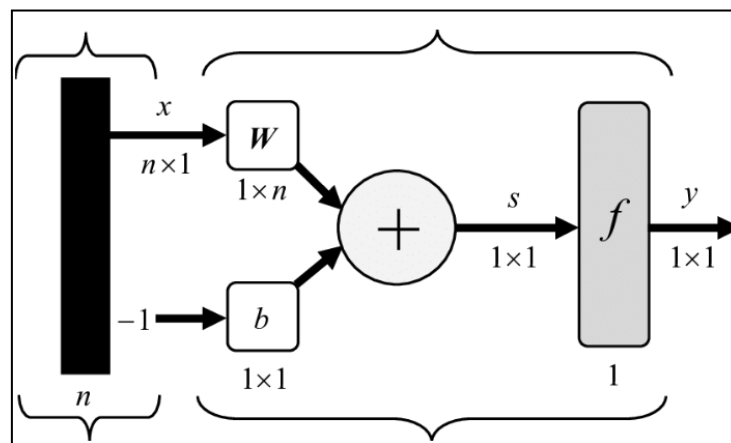


Figure II.2 représentation matricielle de la structure du neurone.

II.4. Neurone formel (Artificiel)

Le neurone formel représente la brique de base des RNA, c'est un automate dont le modèle s'inspire de celui d'un neurone biologique. Ils présentent un modèle assez simple pour le neurone et explorent les possibilités de ce modèle pour concevoir tous les réseaux de neurones. Cette modélisation consiste à mettre en oeuvre le système sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique qu'on aura une correspondance pour chaque élément composante neurone biologique, (voir figure II.3). [29]

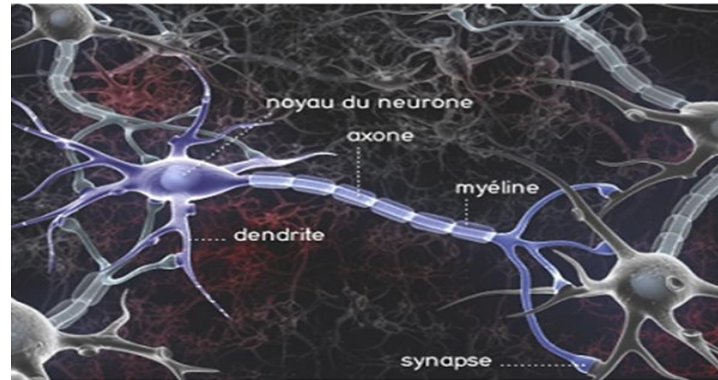


Figure II.3. Représentation schématique d'un neurone biologique

On pourra résumer cette modélisation par le tableau ci-dessous (tableau II.1), qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel.

Neurone artificiel	Neurone biologique
Poids de connexion	Synapses
Signal de sortie	Axones
Signal d'entrée	Dendrite
Fonction d'activation	Soma

Tableau II.1. Transition entre le neurone biologique et le neurone formel.

II.5. Structure d'un neurone artificiel

Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($i=1..n$). Les paramètres w_i reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie du neurone est donnée par :

Sortie = $f(x)$, avec :

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (\text{II.1})$$

x : est l'état d'activation du neurone (également appelé état ou activité).

f : est la fonction d'activation du neurone.

Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées.

Les fonctions les plus connues sont la fonction signe, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde. Leur choix revêt une importance capitale comme nous le verrons par la suite.

Les réseaux de neurones sont constitués des neurones élémentaires connectés entre eux par l'intermédiaire des poids qui jouent le rôle des synapses.

L'information est portée par la valeur de ces poids tandis que la structure du réseau de neurones ne sert qu'à traiter cette information et à l'acheminer vers la sortie.[30]

Le réseau de neurones fait partie des réseaux adaptatifs non-linéaires, cela signifie que ses agents (neurones) s'organisent et modifient leurs liens mutuels lors d'une procédure fondamentale qu'est l'apprentissage. Pour une tâche précise, l'apprentissage du réseau de neurone consiste donc à adapter les différents poids w_i , (figure II.4).

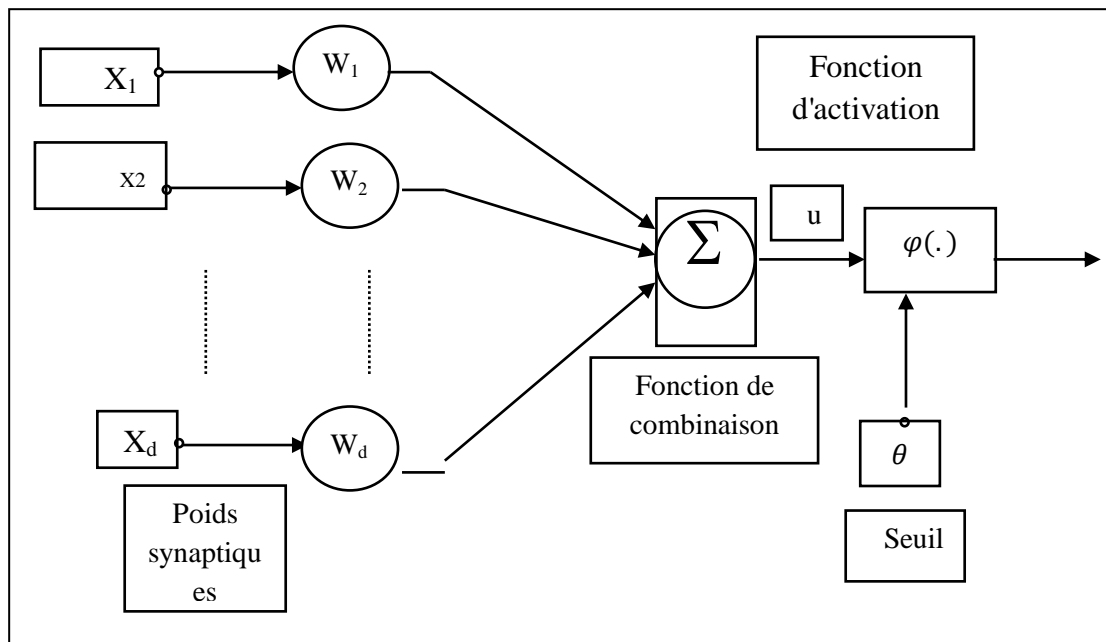


Figure II.4. Représentation d'un neurone.

II.6. Réseaux de neurones Artificiels

Les réseaux de neurones (RNA) est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, ces

(RNA) sont une métaphore des structures cérébrales et de traitement parallèle et distribué d'information et comportent plusieurs éléments de traitement appelé neurone.

Chaque neurone fonctionne indépendamment des autres de telle sorte que l'ensemble est un système parallèle fortement interconnecté. L'information détenue par le réseau de neurone est distribuée à travers l'ensemble des constituants et non localisée dans une partie de mémoire sous la forme d'un symbole.

Le réseau de neurone ne se programme jamais pour réaliser une ou telle tâche, il est entraîné sur des données acquises, grâce à un mécanisme d'apprentissage qui agit sur les constituants du réseau afin de réaliser au mieux la tâche souhaitée.

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. Pour concevoir un réseau de neurones il faut suivre une certaine topologie.

La topologie d'un réseau de neurone est définie par son architecture et la nature de ses connexions.[31]

II.6.1 Fonction de combinaison

Considérons un neurone quelconque, il reçoit des neurones en amont un certain nombre de valeurs via ses connexions synaptiques, et il produit une certaine valeur en utilisant une fonction de combinaison. Cette fonction peut donc être formalisée comme étant une fonction vecteur-à-scalaire [32], notamment:

Les réseaux de type MLP (multi-layer perceptron) calculent une combinaison linéaire des entrées, c'est-à-dire que la fonction de combinaison renvoie le produit scalaire entre le vecteur des entrées et le vecteur des poids synaptiques [32].

Les réseaux de type RBF (Radial Basis Function) calculent la distance entre les entrées, c'est-à-dire que la fonction de combinaison renvoie la norme euclidienne du vecteur issu de la différence vectorielle entre les vecteurs d'entrées.

II.6.2 Fonction d'activation

La fonction d'activation (ou fonction de seuillage, ou encore fonction de transfert) sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone.

Les fonctions de seuillage présentent généralement trois intervalles :[26]

en dessous du seuil, le neurone est non-actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 0 ou -1) ;

aux alentours du seuil, une phase de transition ;

au-dessus du seuil, le neurone est actif (souvent dans ce cas, sa sortie vaut 1).

Des exemples classiques de fonctions d'activation sont :

La fonction sigmoïde.

La fonction tangente hyperbolique.

La fonction de Heaviside.

II.6.3 Propriétés des réseaux de neurones

La plus fondamentale des propriétés propres au réseau de neurones est sa capacité d'apprendre de son environnement et d'améliorer sa performance à travers un processus d'apprentissage.

On définit l'apprentissage comme étant un changement opéré dans la mémoire du réseau en affectant les valeurs des poids synaptiques qui relient les neurones entre eux, afin d'adapter le traitement effectué par le réseau à une tâche particulière.[33]

De ce fait l'apprentissage a pour objectif l'amélioration des performances futures du réseau, sur la base d'une connaissance acquise au fur et à mesure des expériences passées.

II.7. Différents types de réseaux de neurones

L'ensemble des poids des liaisons synaptiques détermine le fonctionnement du réseau de neurones. Les motifs sont présentés à un sous-ensemble du réseau de neurones : la couche d'entrée. Lorsqu'un motif est appliqué à un réseau, celui-ci cherche à atteindre un état stable. Lorsqu'il est atteint, les valeurs d'activation des neurones de sortie constituent le résultat les neurones qui ne font ni partie de la couche d'entrée ni de neurones de sortie constituent le résultat.

Les neurones qui ne font ni partie de la couche d'entrée ni de la couche de sortie sont dits neurones cachés.

Les types de réseau de neurones diffèrent par plusieurs paramètres [34] :

-La topologie des connexions entre les neurones;

-la fonction d'agrégation utilisée (somme pondérée, distance pseudo-euclidienne...);

-la fonction de seuillage utilisée (sigmoïde, échelon, fonction linéaire, fonction de Gauss...);

d'autres paramètres, spécifiques à certains types de réseaux de neurones, tels que la méthode de relaxation pour les réseaux de neurones (réseaux de Hopfield par exemple) qui ne sont pas à propagation simple (perceptron multicouche par exemple).

De nombreux autres paramètres sont susceptibles d'être mis en œuvre dans le cadre de l'apprentissage de ces réseaux de neurones. [34]

II.7.1. Réseaux à apprentissages supervisés ADALINE (adaptive linear neuron)

Le réseau ADALINE est proche du modèle perceptron, seule sa fonction d'activation est différente puisqu'il utilise une fonction linéaire.

Afin de réduire les parasites reçus en entrée, les réseaux ADALINE utilisent la méthode des moindres carrés.

Le réseau réalise une somme pondérée de ses valeurs d'entrées et y rajoute une valeur de seuil prédéfinie. La fonction de transfert linéaire est ensuite utilisée pour l'activation du neurone. Lors de l'apprentissage, les coefficients synaptiques des différentes entrées sont modifiés en utilisant la loi de Widrow-Hoff.[26]

II.7.2. Méthode de la Rétro propagation du gradient

La rétropropagation est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine de réseaux de neurones. C'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables.

Mathématiquement, cette méthode est basée sur l'algorithme de descente du gradient et utilise les règles de dérivation des fonctions dérivables. Dans cette méthode, l'erreur commise en sortie du réseau sera rétro-propagée vers les couches cachées d'où le nom de rétro-propagation.

L'approche la plus utilisée pour la minimisation de la fonction E (erreur) est basée sur la méthode du gradient. On commence l'entraînement par un choix aléatoire des vecteurs initiaux du poids.

On présente le premier vecteur d'entrée, une fois on a la sortie du réseau, l'erreur correspondante et le gradient de l'erreur par rapport à tous les poids sont calculés. Les poids sont alors ajustés. On refait la même procédure pour tous les exemples d'apprentissage. Ce processus est répété jusqu'à ce que les sorties du réseau soient suffisamment proches des sorties désirées.

Avant de définir l'algorithme d'apprentissage, on doit définir la relation entre les sorties du réseau d'une part, et les entrées et les poids d'autre part.

Dans un réseau à (l) couches ayant (n) entrées et (m) sorties les états des différents neurones sont donnés par :

$$U_i^l(k) = f^l(p_i^l(k))$$

(II.2)

Avec:

$$p_i^l(k) = \sum_{j=1}^{N_{l-1}} w_{ij}^l U_j^{l-1}(k)$$

(II.3)

Où $i = 1, 2, \dots, N_l$

Et $j = 1, 2, \dots, N_{l-1}$

et $q = 1, 2, \dots, N_{l+1}$

N_l : nombre de neurones dans la couche l.

N_{l-1} : nombre de neurones dans la couche l-1. N_{l+1} : nombre de neurones dans la couche l+1. L: nombre de couches.

II.7.3. Algorithme d'apprentissage

Définir l'architecture d'un RNA pour un problème quelconque revient à faire un choix judicieux de la taille du réseau, du nombre total de couches et de neurones, distribution des données et des fonctions de transfert. Le choix de ces paramètres dépend de l'utilisateur.

Il n'existe pas dans la littérature pour le moment des données suffisantes qui peuvent déterminer clairement les paramètres à adopter pour résoudre un problème donné.

Les différentes techniques présentées par différents auteurs sont destinées à résoudre des cas particuliers.[35]

Le choix d'utiliser le Perceptron multicouches (PMC) et l'algorithme rétro-propagation est dû principalement à la popularité de ces deux derniers dans la gestion des relations non linéaire entre les variables.

L'algorithme d'apprentissage de rétro-propagation consiste dans un premier temps à circuler vers l'avant les données d'entrées jusqu'à l'obtention d'une entrée calculée par le réseau, puis la seconde étape est de comparer la sortie calculée à la sortie réelle connue.

Les poids sont modifiés de telle sorte qu'à la prochaine itération, l'erreur commise entre la sortie calculée est minimisée, en prenant en considération la présence des couches cachées, l'erreur est rétro-propagé vers l'arrière jusqu'à la couche d'entrée tout en modifiant la pondération.

Le processus est répété sur tous les exemples jusqu'au temps où l'on obtienne une erreur de sortie considérée comme négligeable.

II.8. Domaine d'application des réseaux de neurones (RNA)

Les (RNA) aujourd'hui ont des applications dans des domaines variés parmi lesquelles on cite :

II.8.1. L'application au traitement du signal

Dans ce domaine les applications réalisées traitent essentiellement de la reconnaissance de signatures radar ou sonner. La société NESTOR a développé un réseau de neurones qui identifie une cible à coup sur (100% de réussite) et reconnaît du bruit avec un taux de réussite de 95%.

Cette application a été construite à partir de signaux sonars et des traits caractéristiques de ces signaux déterminés par les experts comme utiles pour identifier une cible en environnement bruité. Le réseau agit dans ces comme un filtre pour éliminer le bruit.

II.8.2. L'application à la planification

L'optimisation est souvent sollicitée pour la planification des actions ou des tâches. A cet effet, l'utilisation du modèle de Hop Field et du modèle de Kohonen paraît très utile pour la résolution des problèmes d'optimisation.[36]

II.8.3. L'application au contrôle

Grâce à leur propriétés (parallélisme de traitement, capacité d'adaptation, et de généralisation, etc).

Les réseaux de neurones sont appliqués au contrôle intelligent. Par exemple plusieurs tentatives ont été faites pour appliquer les réseaux de neurones.

Ces applications peuvent être classifiés en plusieurs méthode, Telles que : le contrôle supervisé. Le contrôle inverse et le contrôle neuronal adaptatif. [36]

II.8.4. L'application au diagnostic

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes.

Dans ce contexte on distingue plusieurs applications des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances et en particulier, pour le diagnostic des pannes des machines électriques.

Dans les réseaux électriques une large stratégie qui vise à faire le diagnostic du réseau de transport d'énergie algérien.

Dans notre travail en particulier, nous nous intéressons à la prédiction de l'évolution des propriétés diélectrique d'un isolant solide.

Pour cela nous basons sur les essais effectués au laboratoire de haute tension de l'université de Tizi-Ouzou. Pour le traitement des résultats, nous avons utilisé la stratégie de réseaux de neurones artificiels (RNA).

II.9. Fonctionnement

Avant de pouvoir utiliser les capacités de classification et d'approximation de fonctions d'un réseau de neurones, il faut le construire, ceci se déroule en quatre temps :

La construction de la structure du réseau (généralement empirique).

La constitution d'une base de données de vecteurs représentant au mieux le domaine à modéliser. Celle-ci est scindée en deux parties : une partie servant à l'apprentissage du réseau (on parle de base d'apprentissage) et une autre partie aux tests de cet apprentissage (on parle de base de test).

Le paramétrage du réseau par apprentissage. Au cours de l'apprentissage, les vecteurs de données de la base d'apprentissage sont présentés séquentiellement et plusieurs fois au réseau. Un algorithme d'apprentissage ajuste le poids du réseau afin que les vecteurs soient correctement appris. L'apprentissage se termine lorsque l'algorithme atteint un état stable.

La phase de reconnaissance qui consiste à présenter au réseau chacun des vecteurs de la base de test. La sortie correspondante est calculée en propageant les vecteurs à travers le réseau, La réponse du réseau est lue directement sur les unités de sortie et comparée à la réponse attendue, une fois que le réseau présente des performances acceptables, il peut être utilisé pour répondre au besoin qui a été à l'origine de sa construction.[37]

II.10. Conclusion

Les réseaux de neurones artificiels, sont le cœur de plusieurs applications réelles, un outil indispensable qui a fait ses preuves dans la pratique par leurs caractéristiques de généralisation et de robustesses face au bruit qui font rêver les chercheurs qui veulent avoir le parfait. Alors ces réseaux-là ne sont en fait qu'un :

Ensemble de neurones formels inspiré du neurone biologique,

Relié entre eux par des synapses contenant des poids,

Utilisant un nombre d'algorithmes d'apprentissage afin de réaliser une tâche généralement la classification, prédiction, approximation.

L'apprentissage implique des modifications physiques des connexions entre neurones est calcul les poids. Les réseaux de neurones multicouches à rétro propagation du gradient, par leurs capacités remarquables d'apprentissage et de reconnaissance des formes constituent de manière incontestable l'outil privilégié.

L'implémentation de technique d'intelligence artificielle pour la prédiction des propriétés diélectriques du polychlorure de vinyle (PVC) reste un objectif essentiel de notre travail.

III.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le matériau : polychlorure de vinyle (PVC), ainsi que les montages expérimentaux utilisés pour les mesures lors des essais.

III.2.Présentation du matériau utilisé le polychlorure de vinyle (PVC)

La première découverte de PVC par E. Baumann date de 1872[38]. Ce polymère est largement utilisé dans le monde industriel, il se classe en deuxième position après le polyéthylène. La large utilisation du PVC dans la fabrication des câbles moyenne tension, comme isolant et matériau de gaine de protection revient, d'une part à son faible coût de revient et d'autre part à ses bonnes qualités d'isolation électrique. La souffrance de ce matériau de la mauvaise stabilité thermique, freine son utilisation comme un isolant dans les câbles HT.

III.2.1.Formule molécule de PVC

Le PVC a pour formule chimique $(\text{CH}-\text{CHCl})_n$ (figure III.1). Il est obtenu par polymérisation radicalaire du monomère chlorure de vinyle $\text{CH}=\text{CHCl}$. [39]

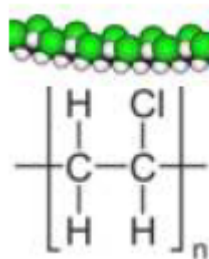


Figure.III.1 : Polychlorure de vinyle

III.2.2. Caractéristiques et propriétés d'usage du PVC :

➤ Caractéristiques

Le PVC offre une excellente résistance au vieillissement, aux agressions chimiques, aux rayons ultraviolets, à la corrosion, aux chocs et à l'usure ; il est léger et a de bonnes propriétés d'isolation électrique, thermique et phonique. Grâce à cette résistance, 65% des articles fabriquées en PVC ont des durées de vie supérieures à 15 ans, 24% entre 2 et 15 ans, 12% de moins de 2 ans. [40].

➤ **Comportement au feu :**

Le PVC se décompose dans une flamme en libérant de l'acide chlorhydrique gazeux mais il est auto extinguable. Les PVC plastifiés brûlent plus facilement. [41]

➤ **Propriétés physico-chimiques**

Le PVC est un polymère atactique donc essentiellement amorphe, mais il arrive que, localement sur de courts segments de chaînes, le PVC soit syndiotactique et puisse s'organiser en phase cristalline, mais le taux de cristallinité ne dépasse jamais 10 à 15%. [42].

- ✓ La masse volumique des compositions de PVC varie entre 1 et 2 g/cm³ à la température ambiante.
- ✓ Le PVC transmet mal la flamme, mais sa combustion entraîne le dégagement de gaz corrosifs et de fumées.
- ✓ Thermiquement, il vieillit bien. Plusieurs chercheurs ont apporté leurs contributions à l'étude de vieillissement thermique du PVC.
- ✓ Il résiste au fluage à température élevée mais il reste aux basses températures.
- ✓ La température de transition vitreuse du PVC est élevée, elle se situe entre 75 °C et 80°C ce qui le rend impropre à de nombreuses applications (câble par exemple) sans l'adjonction de plastifiants. Avec l'emploi de plastifiants, la température de transition vitreuse se situe entre -10 °C et - 5 °C. [43].

➤ **Propriétés électriques :**

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

- ✓ Le facteur de pertes diélectriques à 50Hz et 20 °C est de l'ordre de 15×10^{-4} .
- ✓ La constante diélectrique à 50Hz et 20°C est de l'ordre de 3.4.
- ✓ La résistivité transversale est de l'ordre de $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$.

➤ **Propriétés mécaniques**

- ✓ Le PVC a une bonne résistance à la traction qui est de l'ordre de 5.5 à 6 kgf/mm².
- ✓ L'allongement à la rupture est de l'ordre de 100% pour les produits non plastifiés et 200 à 400% pour les produits plastifiés.

➤ **Propriétés chimiques**

Le PVC sans plastifiant possède une bonne résistance aux produits chimiques : Acides, bases, huiles, alcools, hydrocarbures aliphatiques. Par contre, il est sensible aux hydrocarbures aromatiques et chlorés. Le PVC souple est beaucoup plus sensible aux agents chimiques.

➤ **Propriétés thermiques**

- ✓ Conductivité thermique : elle est d'environ $0,2 \text{ w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$.
- ✓ Capacité thermique massique : elle est d'environ $1046 \text{ J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$
- ✓ Pouvoir calorifique : il est de 17 kJ/kg environ, pour les PVC non plastifiés et de valeur supérieure mais variable suivant la formulation pour les PVC plastifiés.
- ✓ Température de ramollissement Vicat : La température de ramollissement Vicat pour les PVC non plastifiés se situe entre 65 et $85 \text{ }^\circ\text{C}$. pour des mélanges de PVC et de PVC chlorés, elle peut atteindre des valeurs supérieures à 100°C ;
- ✓ Température de fléchissement sous charge : elle ne s'applique qu'aux PVC non plastifiés. Elle varie de 55 à $70 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ✓ selon les formulations et peut atteindre 90°C .

III.2.3.Fabrication du PVC

- Le PVC est fabriqué à la fois à partir d'éthylène issu du pétrole et de chlore récupéré de l'électrolyse du sel (Na Cl). Un sous-produit est créé lors de la réaction entre le chlore et l'éthylène : l'acide chlorhydrique. Cette réaction donne naissance au monomère de chlore de vinyle. La polymérisation s'effectue systématiquement en autoclave

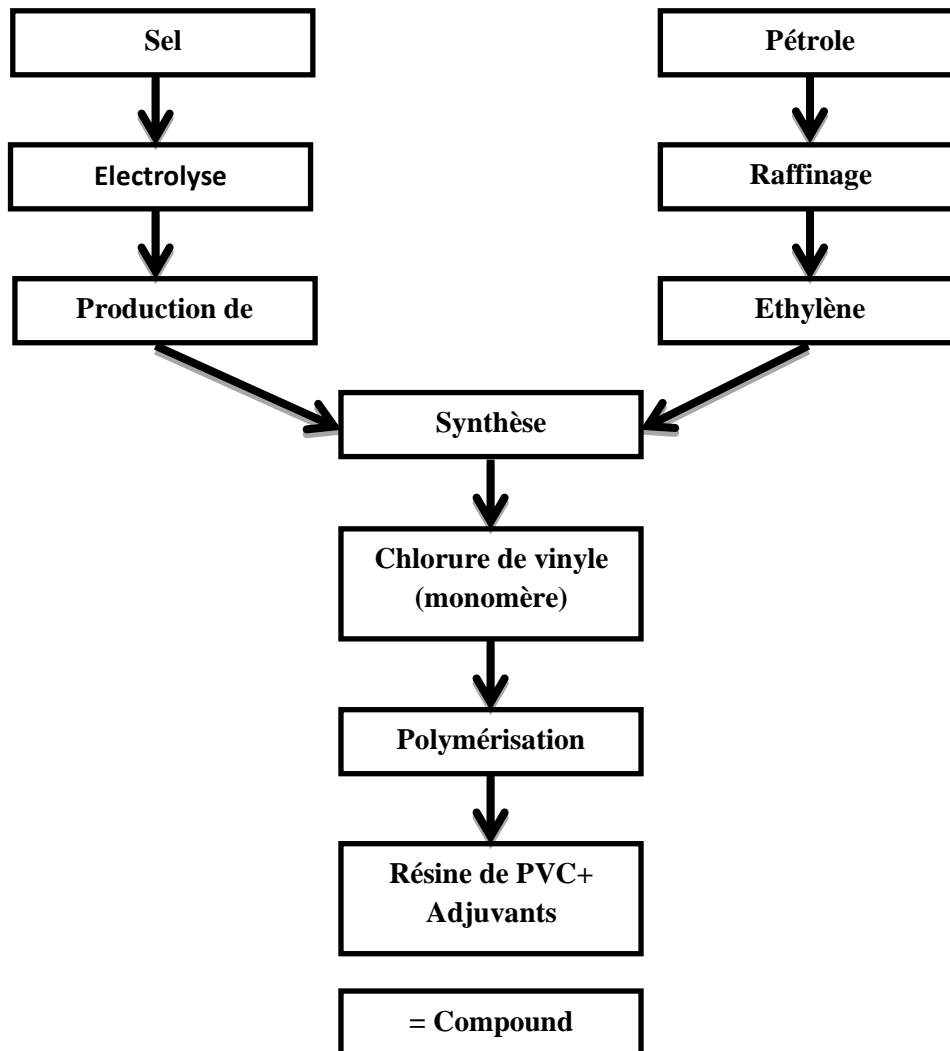


Fig.III.2 : Tableaux de fabrication du PVC

III.2.4. Utilisation du PVC

Le poly (chlorure de vinyle) connaît encore un taux d'expansion élevé. Dans sa forme rigide, il est très utilisé pour la fabrication de tuyauteries, aisément assemblées au moyen d'un collodion dans le tétrahydrofurane. Cette application est liée à son faible cout, son inertie chimique et sa très bonne résistance au vieillissement à la température ambiante. Il est aussi très utilisé pour l'emballage alimentaire.

Depuis quelques décennies, le PVC trouve de nombreuses applications dans le bâtiment (huisseries) ou il apporte son caractère ignifuge. Les fibres de PVC ; obtenues par filage à sec à partir de collodions dans le tétrahydrofurane, servent à faire des tissus d'ameublement imputrescibles et auto-ignifuges.

Enfin, le caractère qui nous intéresse dans notre travail est l'isolation électrique. Le PVC est utilisé comme gainage et isolant de câbles d'énergie électrique.

III.3. Préparation des échantillons

Dans nos essais, nous avons utilisé des échantillons du PVC en forme de disque de 6 cm de rayon et 4 mm d'épaisseur, fabriqués spécialement pour la recherche par l'entreprise ENICAB de Biskra.

Le schéma du dispositif expérimental plan-plan utilisé dans cette étude est représenté sur la figure 1. Les décharges électriques ont été obtenues en alimentant les deux électrodes à l'aide d'une tension alternative délivrée par un transformateur d'essai dont les caractéristiques sont :

$U = 100 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $S = 10 \text{ kVA}$, la variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur qui se trouve au niveau du pupitre de commande.

Les échantillons ont été vieillis sous un champ électrique de 6 kV/mm .

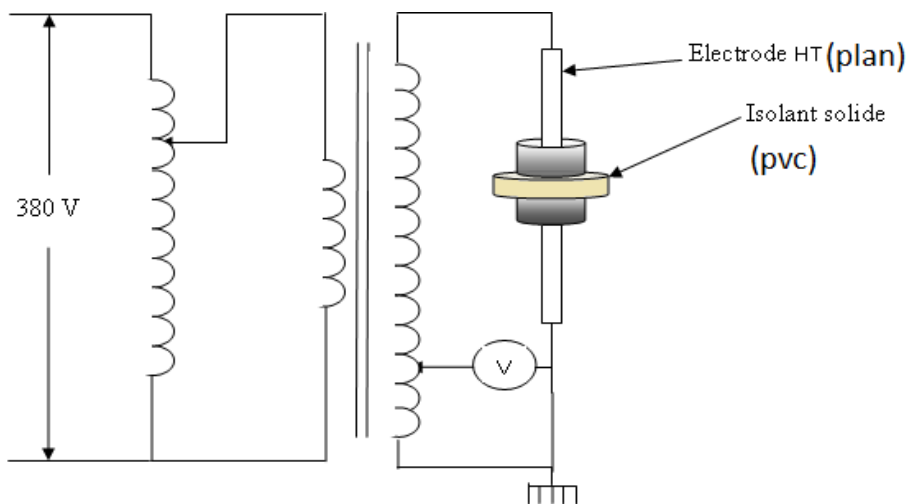


Fig.III.3. Dispositif expérimental pour le PVC

Nous avons étudié la variation de la résistivité, de la permittivité relative ϵ_r et le facteur de dissipation $tg\delta$ (angle de pertes) du polymère en fonction de la durée de la contrainte appliquée (champ électrique uniforme) et de la fréquence. En utilisant un LCR mètre, nous

avons mesuré le facteur de dissipation $tg\delta$, la capacité C et la résistance R en fonction de la fréquence.



Fig.III.4 : la spectroscopie d'impédance (LCR mètre)

Nous avons calculé la permittivité relative et la résistivité d'après les équations suivantes :

$$\epsilon_r = \frac{e.C}{S.\epsilon_0} \quad (1)$$

Avec :

e : épaisseur de l'échantillon (m)

C : la capacité entre les deux électrodes (C)

ϵ_0 : la permittivité du vide, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

S : la surface de l'échantillon (m²)

$$\rho = \frac{R.s}{e} \quad (2)$$

R : la résistance du solide (k Ω)

III.3.2. Présentation du laboratoire de haute tension

Nous avons réalisé nos essais au laboratoire de haute tension de l'université mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou. Le laboratoire est équipé d'une cage de Faraday (figure III.5), d'un transformateur d'essai figure (III.6), dont les caractéristiques sont les suivantes : U =100kV, f=50Hz, S=10kVA. La variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur qui se trouve au niveau du pupitre de commande (figure III.7). La figure (III.8) montre le système d'électrodes (plan-plan) utilisé lors des essais de vieillissement.



Fig.III.5 : Laboratoire haut tension



Fig.III.6 : Transformateur d'essai



Fig.III. 7 : Pupitre de commande

- 1** Bouton d'allumage et d'arrêt d'urgence
- 2** Curseur pour régler la tension
- 3** Voltmètre



Fig.III.8 : Dispositif expérimental

III.4. Observation par microscope électronique à balayage (MEB)

La figure II.9 montre le MEB utilisé pour l'analyse des surfaces des échantillons.



Fig.III.9. Dispositif du MEB

III.5. Prédiction des propriétés diélectrique du PVC en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA)

Il n'y a pas de méthode systématique pour le choix de l'architecture du réseau, en particulier, le nombre de neurones, le nombre de couches ou le choix des paramètres internes de l'algorithme d'apprentissage.

D'après les travaux publiés dans la littérature, nous avons remarqué que les réseaux de type perceptron multicouche (PMC) sont les plus utilisés dans les études de prédiction, d'où le choix de ce type de réseau.

Nous utiliserons un apprentissage supervisé, par correction des erreurs où le signal d'erreur est rétro-propagé vers les entrées afin de mettre à jour les poids synaptiques.

III.5.1. Conception du réseau de neurones

La mise en œuvre d'un RNA nécessite [31]:

✚ La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est à dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser,

- ✚ La collecte des données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones,
- ✚ La détermination du nombre de neurones cachés et couches cachées nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante,
- ✚ La réalisation de l'apprentissage,
- ✚ L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage.

III.5.2. Détermination des entrées/sorties du réseau de neurone

Avant de créer un réseau, il faut d'abord introduire les entrées qui sont dans notre cas la fréquence (f), la tension appliquée (V) et le temps de vieillissement (t), (tableau III.2), les valeurs de la permittivité relative (ϵ_r) (ou le facteur de pertes diélectriques ou la résistivité transversale (ρ)) seront considérées comme seule sortie de notre RNA.

La méthodologie suivie pour les déterminer est la suivante :

En se référant à la base des résultats pratiques obtenu lors de nos essais expérimentaux, nous avons fait correspondre à chaque étape atteinte de la décharge, pour chaque triplet (f , v , t), une valeur de sortie " ϵ_r ", " $\tan \delta$ " ou " ρ ".

Entrées		Sortie	
Symbole	Désignation	Symbole	Désignation
f (kHz)	Fréquence (1-10)	ϵ_r , $\tan \delta$; ρ	-Permittivité relative ;
V(kV)	Tension (24)		- Facteur de pertes ;
t (h)	Temps de vieillissement (0-10)		-Résistivité transversale

Tableau III.2. Variables d'entrées et sortie.

III.5.3. Nombre de couches cachées

Le choix du nombre de couches cachées dépend généralement de la complexité du problème à résoudre, en théorie une seule couche cachée peut être suffisante pour résoudre un problème donné mais il se peut que le fait de disposer de plusieurs couches cachées permet de résoudre plus facilement un problème complexe malgré qu'il a été démontré qu'un Perceptron Multicouches avec une seule couche cachée pourvue d'un nombre suffisant de neurones, peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée. [31]

III.5.4. Nombre de neurones

Un nombre plus important permet donc de mieux "coller" aux données présentées mais diminue la capacité de généralisation du réseau.

Il faut alors trouver le nombre adéquat de neurones cachés nécessaire pour obtenir une approximation satisfaisante. Il n'existe pas, à ce jour, de règle permettant de prévoir le nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une performance spécifique du modèle, compte tenu des modèles disponibles. [31]

III.5.5. Apprentissage

Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les paramètres du réseau sont adaptés, d'où l'existence de plusieurs algorithmes d'apprentissage. L'algorithme d'apprentissage utilisé dans notre étude sera donné dans ce qui suit.

III.5.6. Validation et Tests

Nous avons deux bases de données, une pour effectuer l'entraînement de notre RNA pour vérifier les performances du RNA. Concernant la base de données que nous avons utilisée est collectée de la littérature. [32]

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le matériau utilisé (PVC), nous avons donné ses propriétés et caractéristiques. Ensuite, nous avons décrit les méthodes expérimentales, et Elles comprennent la préparation des échantillons, les dispositifs de mesure ainsi que les méthodes de caractérisation électrique, à savoir la résistivité, la permittivité et le facteur de pertes diélectriques. Enfin, nous avons présenté le laboratoire de la haute tension de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, ainsi que la méthode de réseaux de neurones pour la prédiction des propriétés diélectriques.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de notre étude expérimentale et par prédiction des effets de vieillissement électrique sur les propriétés diélectrique de PVC. Nous avons également évalué l'état de la dégradation de l'isolant par des observations MEB, en suite on donnera les différentes interprétations de ces résultats.

IV.2 Propriétés diélectrique du PVC

IV .2.1 La permittivité diélectrique

Les variations de la permittivité relative en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement sont représentées sur les figures IV.1, IV.2.

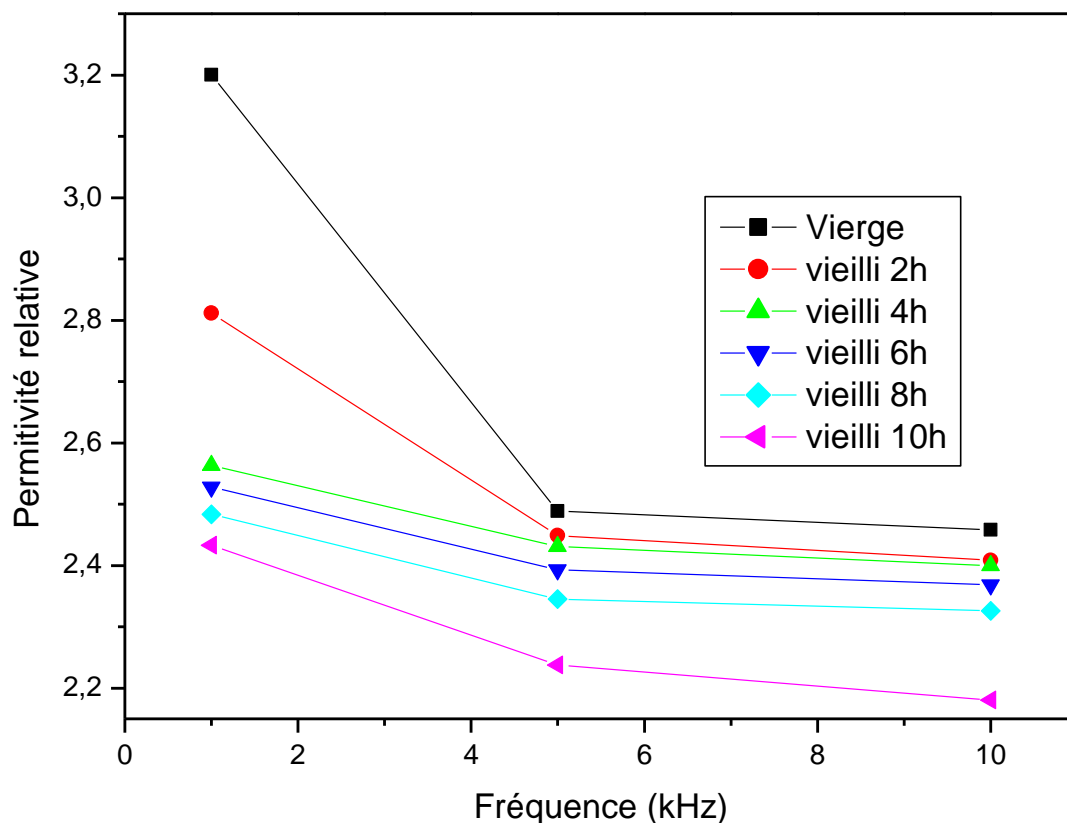


Figure. IV. 1 : Variation de la permittivité relative du PVC en fonction de fréquence et de temps de vieillissement.

Les figures IV.1 et IV.2 montrent l'influence de la fréquence et de la durée de vieillissement sur les propriétés diélectriques du PVC. L'augmentation de la fréquence et de la durée d'application de la contrainte électrique induit à la diminution de la permittivité relative.

Les courbes ont les mêmes allures. Cela peut être expliqué par le réarrangement de la structure moléculaire et le phénomène de réticulation.[45]

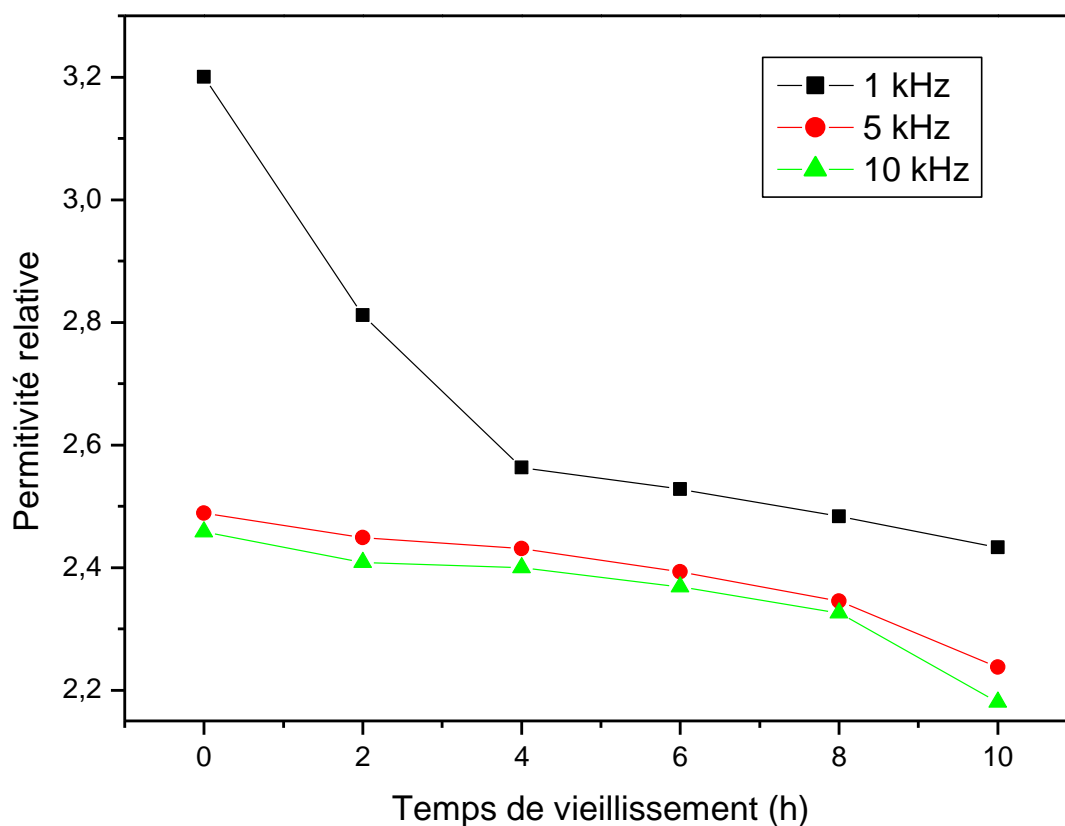


Figure. IV. 2 : Variation de la permittivité relative du PVC en fonction du temps de vieillissement de la fréquence.

IV.2.2 Facteur de pertes diélectriques

Les valeurs de $tg\delta$ sont relevées directement sur LCR mètre, la figure IV.3 représente la variation du facteur de perte en fonction de la fréquence et en fonction du temps de vieillissement.

Nous constatons que $tg\delta$ diminue avec l'augmentation de la fréquence et il augmente avec la durée d'application de la contrainte (champ électrique).

- Cette diminution pourrait s'expliquer par le fait qu'en faibles fréquences les dipôles permanents suivent facilement la variation du champ électrique. Le facteur de dissipation ϵ_r'' tend à s'annuler. Avec l'augmentation de la durée de vieillissement, le facteur de dissipation ϵ_r'' augmente jusqu'à une valeur maximum. Puis il marquera une diminution aussi en augmentant la fréquence. En hautes fréquences les dipôles permanents ne se réorientent plus

assez vite, donc induit à une polarisation d'orientation nulle. Dans notre étude nous avons pu varier la fréquence de : 1, 5 et 10 kHz, situant ainsi dans une zone haute fréquence après le seuil [45].

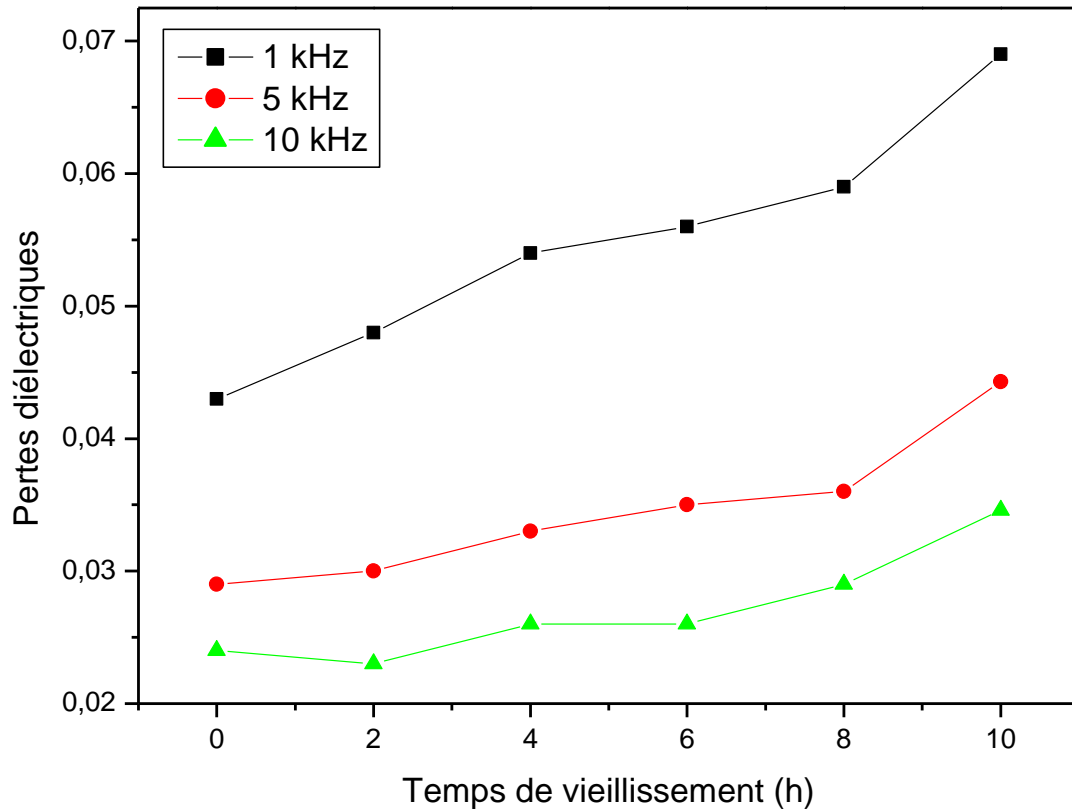


Figure. IV. 3: Variation du facteur de pertes diélectriques du PVC en fonction de la fréquence et de temps de vieillissement.

IV.2.3 Résistivité transversale

La figure IV.4 représente la variation de la résistivité en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement. Nous constatons que l'augmentation de la durée de vieillissement s'accompagne d'une diminution de la résistivité. Cela peut être expliqué par l'injection des porteurs de charge par les électrodes sur la surface du polymère. [46]

On remarque aussi que l'augmentation de la fréquence induit une diminution dans les valeurs de la résistivité.

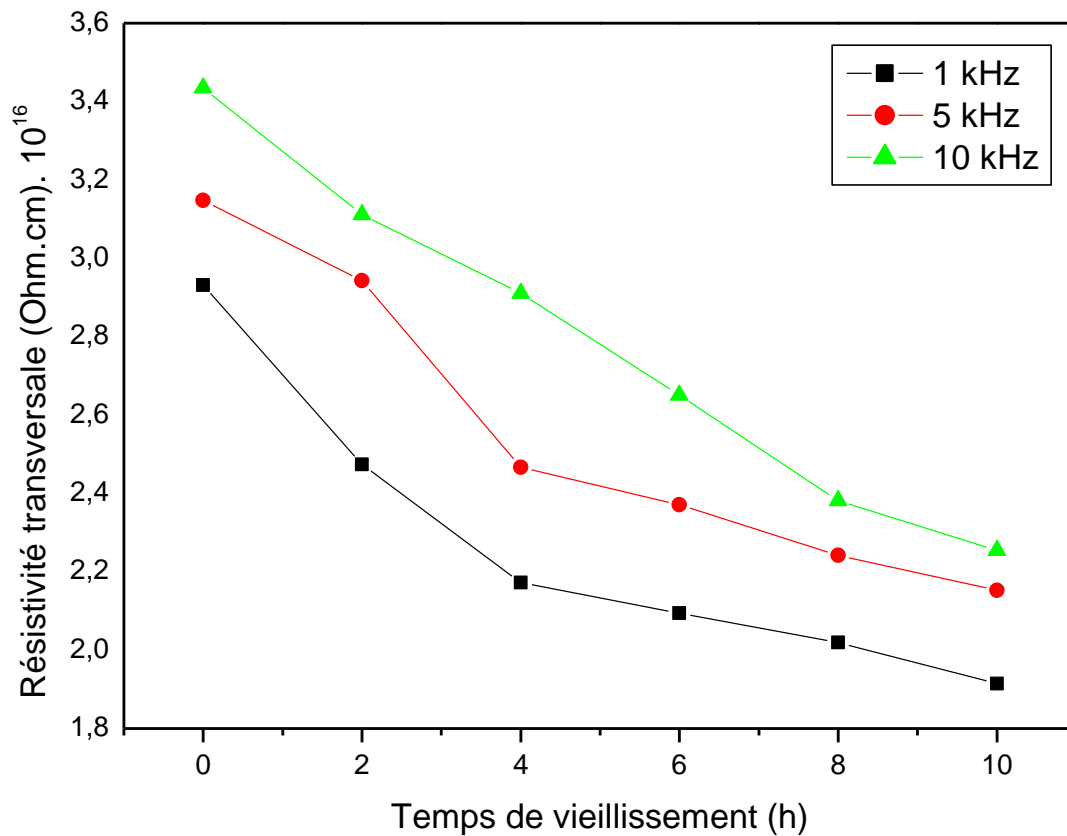


Figure. IV. 4: Variation de la résistivité en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement.

IV.3. Résultats obtenus par prédiction avec la méthode de réseaux de neurones

Les figures (IV.5, IV.6 et IV.7) représentent les variations de la permittivité relative, du facteur de pertes diélectriques et de résistivité transversale respectivement en fonction du temps de vieillissement (valeurs expérimentales et valeurs prédites). Nous remarquons que les valeurs obtenues expérimentalement et celles trouvées par la méthode RNA sont très proches pour les trois propriétés (permittivité relative, facteur de pertes diélectriques et la résistivité).

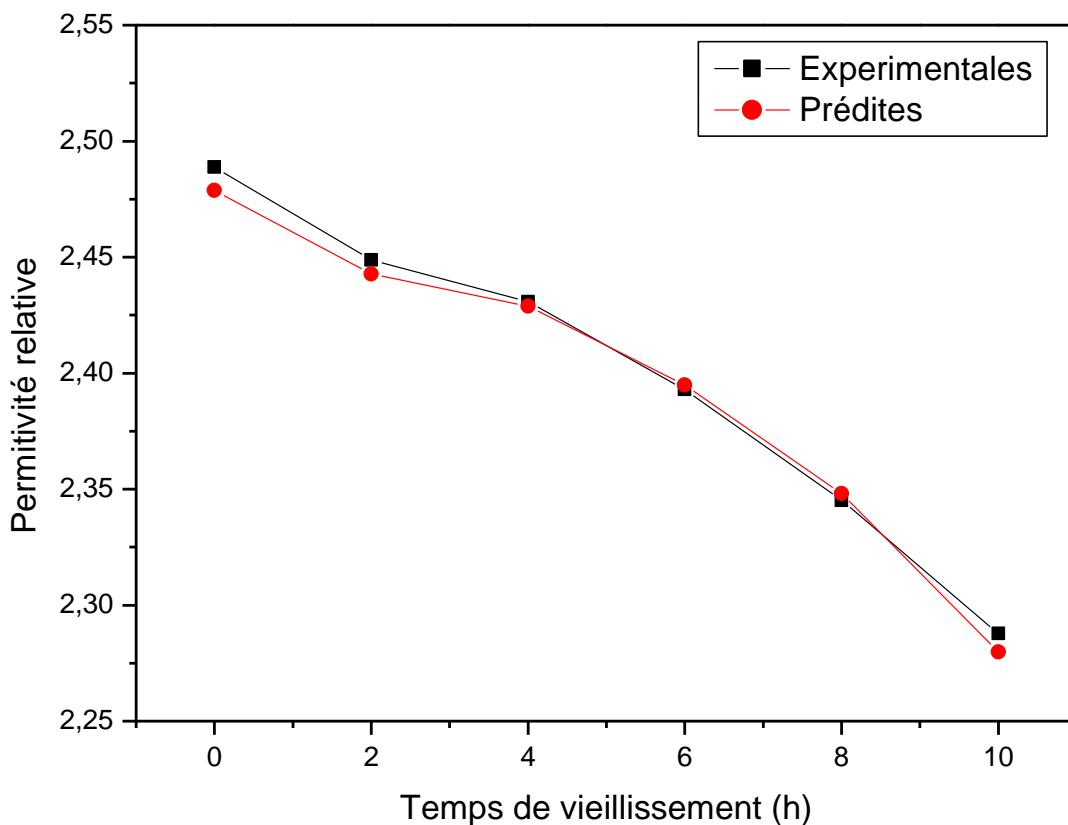


Figure. IV. 5: Variation de la permittivité relative (expérimentale et prédite) en fonction du temps de vieillissement.

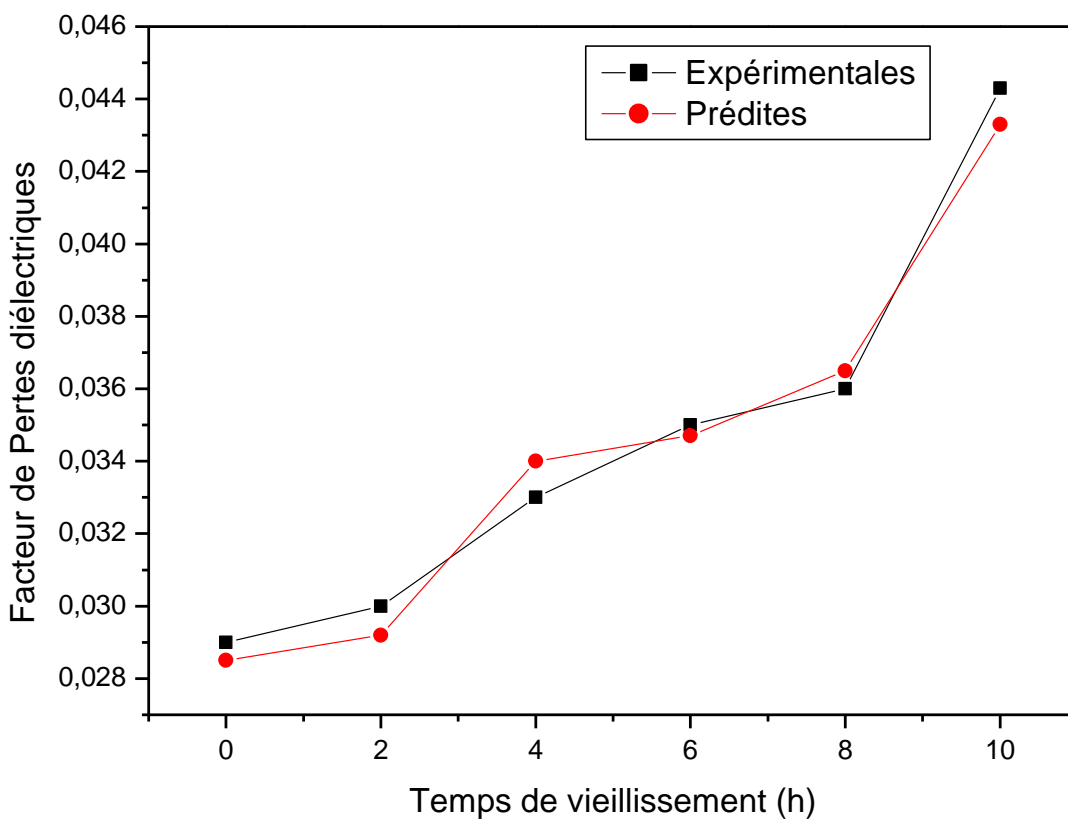


Figure. IV. 6: Variation du facteur de pertes (expérimentale et prédite) en fonction du temps de vieillissement.

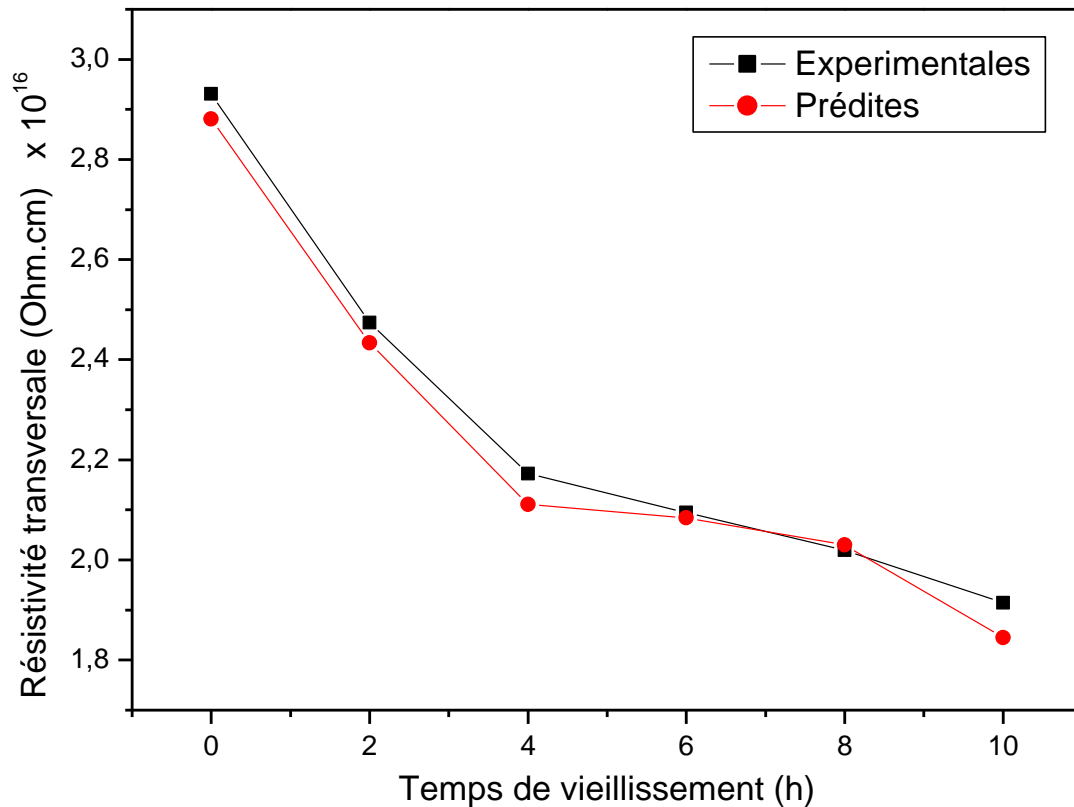


Figure. IV. 7: Variation de la résistivité (expérimentale et prédite) en fonction du temps de vieillissement.

IV.4. Performance du réseau RNA

Les résultats obtenus peuvent être tracés pour comparer les réponses mesurées avec celles prédites.

Pour cela, il est nécessaire de tracer l'adéquation du modèle. Les réponses mesurées sont placées en abscisse et les réponses estimées sont en ordonnées. Les points du nuage sont alignés avec la ligne $y = x$, ce qui signifie que la précision du modèle est très bonne.

Les figures (IV.8, IV.9 et IV.10) représentent une comparaison des valeurs trouvées en pratique et par la méthode de réseau de neurones. Les droites tracées en continue de chaque courbe représentent la régression de la relation qui relie les sorties calculées par RNA à celles trouvées expérimentalement. Nous constatons que les valeurs de "R" obtenues sont très voisines de "1", ce qui veut dire que notre RNA est bien entraîné, et que la tâche de l'apprentissage a réussi. Pour la permittivité relative $R = 0,9927$ (99,27%), pour le facteur de pertes diélectriques $R = 0,9761$ (97,61%) et la résistivité transversale $R = 0,9435$ (94,35%).

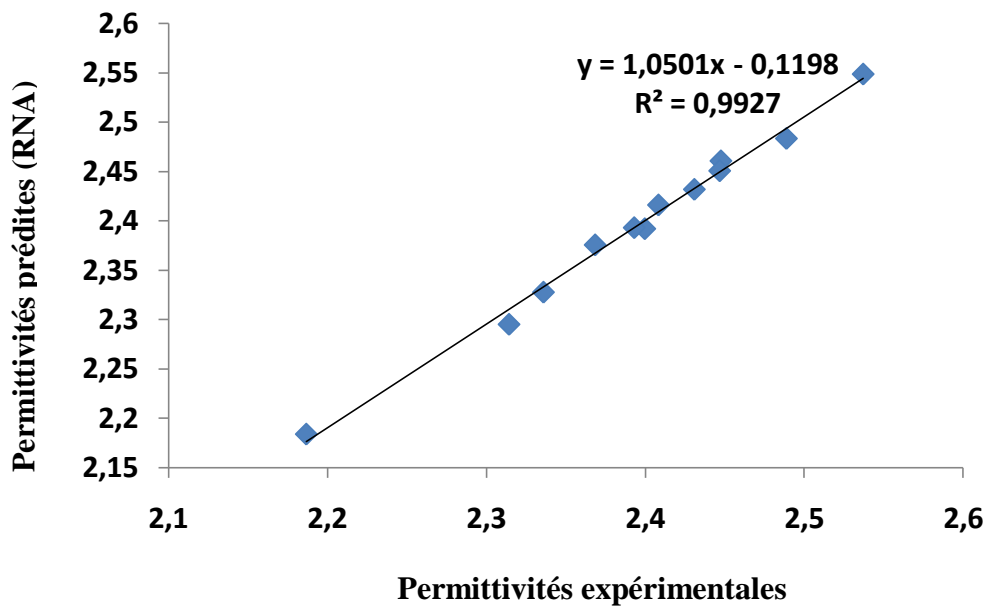


Figure IV.8 : Droite de régression pour les valeurs de la permittivité relative

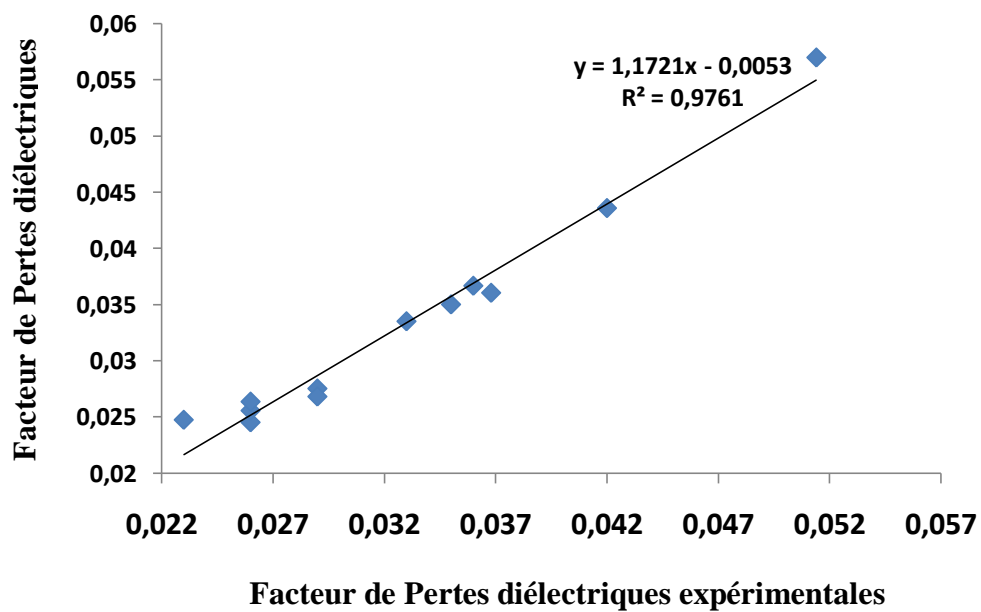


Figure IV.9 : Droite de régression pour les valeurs du facteur de pertes diélectriques

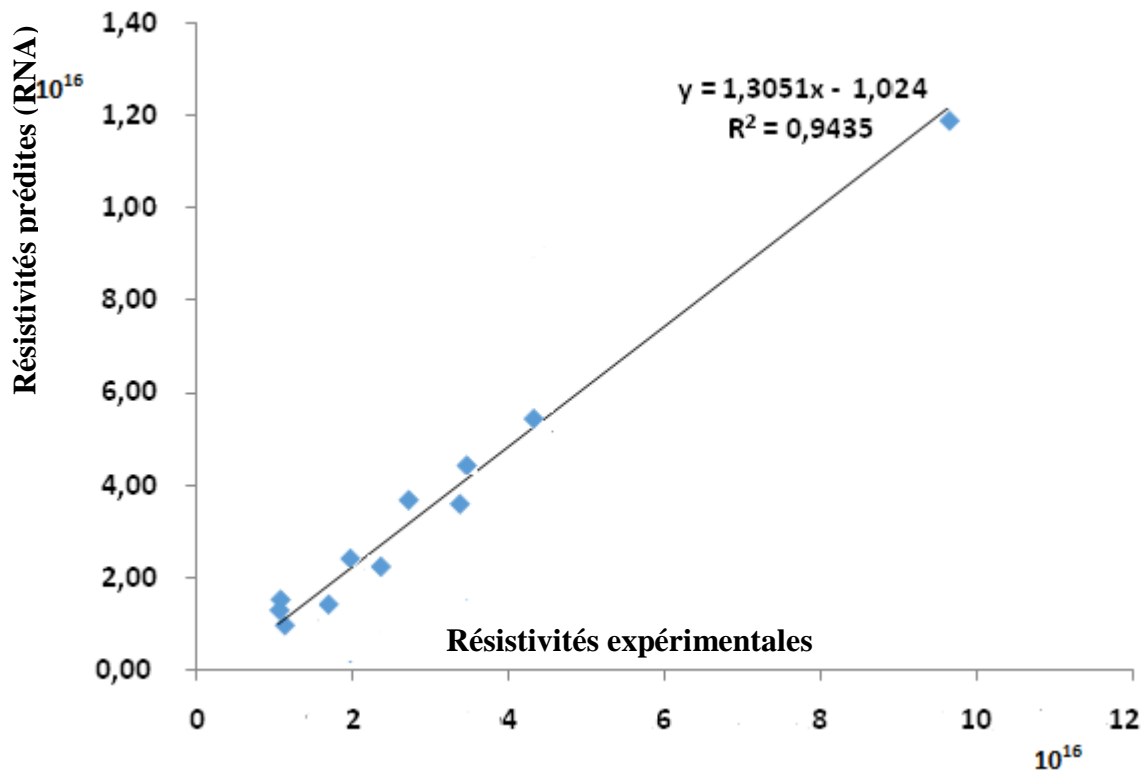


Figure IV.10 : Droite de régression pour les valeurs de la résistivité transversale

IV.5 Observation au microscope électronique à balayage (MEB)

La topographie de ces régions a été observée à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB) de marque Philips JOEL XL30 à filament de tungstène (figure IV.11).

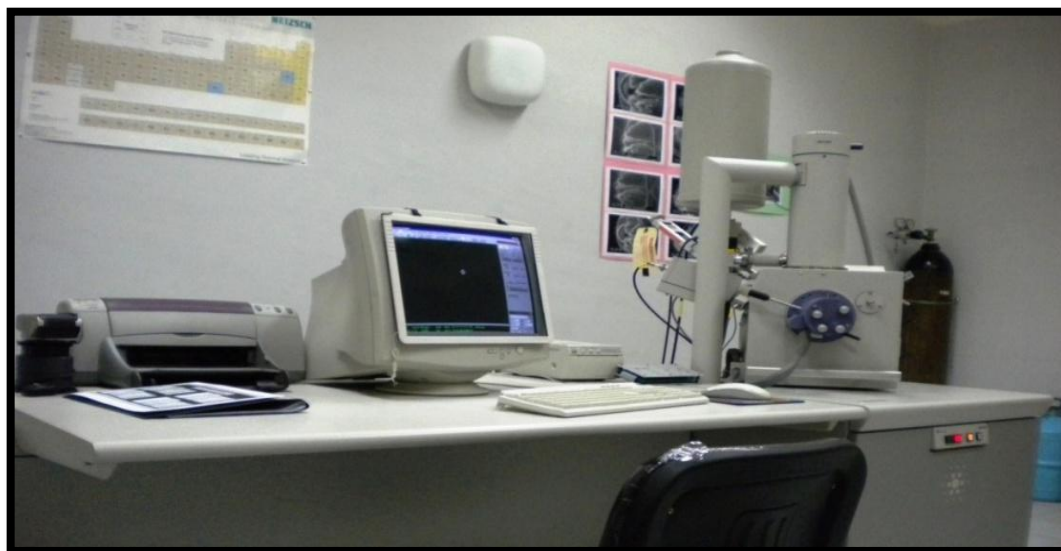


Figure. IV. 11:Microscope Electronique à Balayage (MEB).

L'analyse par MEB des surfaces des échantillons vierge et vieillis sous un champ électrique est donnée sur la figure IV.12

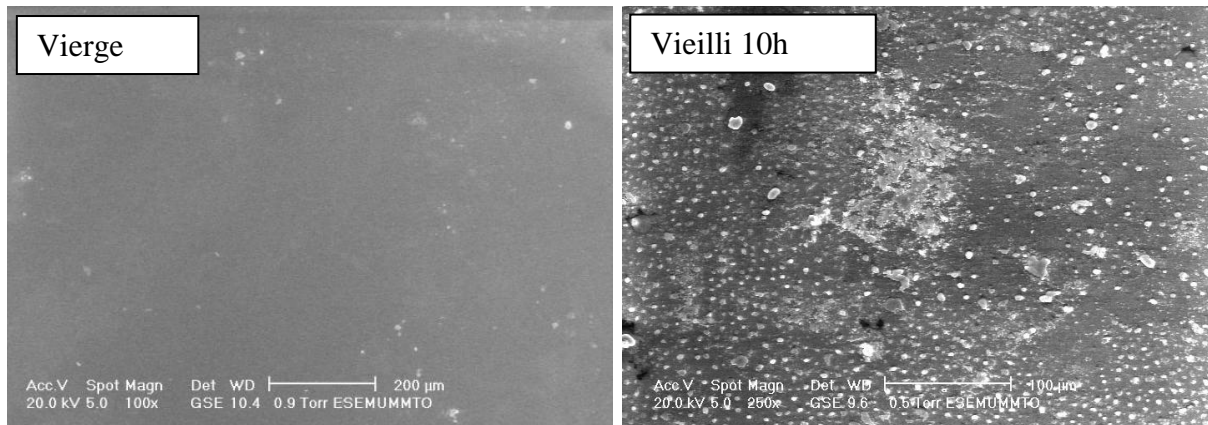


Figure IV.12 : Micrographie MEB du PVC

L'échantillon vierge présente une surface lisse et homogène. Par contre, pour les échantillons soumis à un champ électrique, nous pouvons observer pour des profondeurs d'analyse, la topographie des zones ayant subi des dégradations : présence des points blancs et des cratères.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué l'une des méthodes d'intelligence artificielle les plus utilisées, à savoir les RNA pour la prédiction des propriétés diélectriques.

Parmi les avantages des réseaux de neurones cités dans le chapitre deux, les réseaux de neurones ne nécessitent pas l'utilisation de modèles mathématiques très complexes pour leur fonctionnement, ainsi qu'un taux d'erreur très faible, qui ne dépasse pas 6% dans notre cas. Les résultats obtenus expérimentalement et par prédiction sont très concordants, ce qui dénote le bon choix du modèle de prédiction. L'analyse par MEB a montré la dégradation du polymère (PVC) par présence des points blancs et des cratères.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était l'étude et prédiction du comportement du PVC soumis à un champ électrique par les réseaux de neurones.

Dans la première partie, nous avons donné quelques généralités sur le vieillissement des polymères qui sont des isolants solides présentant de bonnes propriétés physico-chimiques qui les rendent plus utilisés dans les domaines de génie électrique. Nous avons vu par la suite, les notions sur les réseaux de neurones artificiels (RNA).

Dans la deuxième partie (expérimentale) de notre travail, nous avons décrit en détail la préparation des échantillons ainsi que les techniques expérimentales utilisées. Nous avons montré que la durée de l'application du champ électrique influence directement sur les propriétés diélectriques du PVC. L'augmentation de la durée de vieillissement engendre l'augmentation du facteur de pertes diélectriques et la diminution de la permittivité relative et de la résistivité superficielle. Ce qui dénote la dégradation du matériau.

Cette dégradation a été confirmée par les analyses MEB. Les micrographies ont montré le changement de la surface des échantillons après vieillissement. Les résultats trouvés expérimentalement et ceux prédits par RNA sont concordants, ce qui signifie le bon choix du modèle de prédiction.

Résumé :

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à l'étude et la prédiction du comportement du PVC soumis à un vieillissement électrique par les réseaux de neurones. L'influence du vieillissement électrique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation de câbles de transport d'énergie électrique a été mise en évidence. Nous avons montré que la durée de l'application du champ électrique influence directement sur les propriétés diélectriques du PVC. L'augmentation de la durée de vieillissement engendre l'augmentation du facteur de pertes diélectriques et la diminution de la permittivité relative et de la résistivité transversale. Les résultats trouvés expérimentalement et ceux estimés par prédiction sont en très bonne concordance, l'erreur ne dépasse pas les 6% pour les trois paramètres (permittivité, facteur de pertes et résistivité). La contrainte électrique a engendré un changement de la surface des échantillons, ce qui dénote la dégradation du matériau. Cette dégradation a été confirmée par les analyses MEB.

Mots clés : Réseaux de neurones, Propriétés diélectriques, PVC, MEB, vieillissement électrique

Abstract:

In this study we were interested in the study and prediction of the behavior of PVC subjected to electrical aging by neural networks. The influence of electrical aging on the properties of PVC used in the insulation of electrical power transmission cables has been demonstrated. We have shown that the duration of the application of the electric field directly influences the dielectric properties of PVC. The increase in the aging time leads to an increase in the dielectric loss factor and a decrease in the relative permittivity and the transverse resistivity. The results found experimentally and those estimated by prediction are in very good agreement, the error does not exceed 6% for the three parameters (permittivity, loss factor and resistivity). The electrical stress caused a change in the surface of the samples, which indicates the degradation of the material. This degradation was confirmed by SEM analyses.

Keywords: Neural networks, dielectric properties, PVC, SEM, electrical aging

Références bibliographiques

- [1] M. Nedjar, «Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long termes des polymères utilisés dans les dispositifs Haute Tension», Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2003.
- [2] B. Gustafsson, J.-O. Boström, R.C. Dammert, “Stabilization of peroxide Crosslinked polyethylene”, Die Angewandte Makromolekulare Chemie Vol. 261/262, pp. 93-99, 1998.
- [3] I.Ghasemi, J. Morshedian, “The effect of co-agent on the peroxide crosslinking of LDPE”, Iranian Polymer Journal, Vol. 12, pp. 119-125, 2003.
- [4] Novites et *al.*, “Scorch extending curing/cross-linking composition”, U.S. Patent 6, 197-213, 2001.
- [5] C.E.I. 540, “Méthodes d’essais pour les enveloppes isolantes et les gaines des câbles électriques rigides et souples (Mélanges élastomères et thermoplastiques)”, Edition 1983.
- [6] M. Nedjar, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l’isolation des câbles de H.T », Thèse de Magister, U.T.O, Tizi-Ouzou ; Décembre1991
- [7] D.Bouguedad, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l’éthylène propylène diène monomère (EPDM) », thèse, doctorat, UMMTO; 2010
- [8] Jean Claud Martin, « Incendies et explosions d’atmosphère » ; traité de sécurité intérieure. Presses polytechniques et universitaires romandes ; 2008.
- [9] Mohammed Adnane DOUAR « Recherche de matériaux isolants pour la conception d’une nouvelle génération de connecteurs électriques Haute Tension – Influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage » thèse doctorat, L’école centrale de Lyon ; 2014.
- [10] Michel Foutanile et Yves Gnanou« Chimie et physico-chimie des polymères » C311, Paris ; 2010.
- [11] L’indispensable en polymères. Cycle universitaire scientifique. Geneviève M.L. Dumas et Roger I. Bien-aimé ; 2008
- [12] A.K. Jonscher, R. Lacoste, « On a cumulative model of dielectric breakdown in solids », IEEE, Transaction, on Electrical Insulation, Vol. EI-19, N°6, pp. 567-577, Décembre1984.
- [13] O. Gallot-lavallee, « Etude de la charge d’espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d’une résine époxy utilisée dans l’isolation haute tension », Thèse de Doctorat ès sciences, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2004.
- [14]M. Belhiteche El Hadi, « Etude de la dégradation d’un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface », Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.

- [15] Bouguedad Djaffar « influence de vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) », thèse doctorat 2010.
- [16] M.Tahraoui, k.Zania, Thèse d'ingénieur, Option Réseaux Electriques, Département Electrotechnique, UMMTO Tizi-Ouzou, 2011.
- [17] Charles Kittel (trad. Nathalie Bardou, Évelyne Kolb), *Physique de l'état Solide* « Solidstatephysics », détail des éditions, chap. 3.
- [18] J. W. Summers, "A review of Vinyl technology", *Journal of Vinyl & Additive Technology*, Vol. 3, N° 2, pp. 130-139, June 1997.
- [19] D. Braun, "Recycling of PVC", *Progress in Polymer Science*, Vol. 27, pp. 2171-2195, 2002.
- [20] V. Babrauskas, "Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC insulated electrotechnical products", *Fire and Materials*, Vol.30, Issue 2, pp. 151-174, March/April 2006.
- [21] P.M.R.Tendero, A. Jimenez, A. Greco, A. Maffezzoli, "Viscoelastic and thermal characterization of cross-linked PVC", *European Polymer Journal*, Vol. 42, Issue 4, pp.961-969, April 2006.
- [22] R. Bocaloglu, M. Fisch, "Degradation and stabilization of Poly(vinyl chloride). V. reaction mechanism of poly(vinyl chloride) degradation", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 47, pp. 33-57, 1995.
- [23] A. Mohamed Nadia, W. Sabaa Magdy, "Thermal degradation behaviour of Poly(Vinylchloride)-Poly(vinyl butyral) blends", *European Polymer Journal*, Vol. 35, pp. 1731-1737, 1999.
- [24] A. Jiménez, L. Torre, J.M. Kenny, "Thermal degradation of poly(vinyl chloride) plastisols base on low-migration polymeric plasticizers", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 73, pp. 447-453, 2001.
- [25] Tayeb lasfar walid semache. « Intégration d'un réseau de neurones dans un modèle mathématique pour modéliser le comportement fréquentiel de l'hystérésis magnétique » Mémoire de master, Dept. Genie électrique, option Réseaux électriques. Université d'oued. 2018/2019.
- [26] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-de-neurones-artificiels.html>
- [27] <https://www.natural-solutions.eu/blog/histoire-du-deep-learning>
- [28] Ophelie Guinaudeau. Neurone abstrait : une formalisation de l'intégration dendritique et ses propriétés algébriques. Bio-informatique. Université Côte d'Azur, 2019.

- [29] Chayma ABD ELKEBIR, Samia BARKAT.” Implémentation de méthode d'intelligence artificielle pour la prédiction de la tension de contournement d'un isolateur de haute tension artificiellement pollué sous MTLAB/Simulink. Mémoire de master, Dept. Genie électrique, option Réseaux électriques. Université de M'sila. 2018/2019.
- [30] Lotfi Baghli. Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 1999.
- [31] MEDJILI Fayçal, « Modélisation par Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et commande Prédicative non linéaire d'une station de production d'eau froide », Mémoire de magister en automatique, Dept. Electronique, Université d'Annaba, 2010.
- [32] Fatma Zohra Bettahr, Roufaïd Mesbahi, « Diagnostique d'une chaîne des isolateurs de haute tension par la méthode RNA » mémoire de master, dept. Génie électrique, option : réseaux électriques, Université d'el-oued, 2017/2018.
- [33] Sanaa Zaoui épouse Melab, « Application des techniques neuronales pour la prédiction des propriétés thermoélectroniques des éléments ». Thèse de Doctorat en Sciences, en Physique, Spécialité : Physique Théorique, Université des sciences et de la technologie houari Boumediene U.S.T.H.B, 2021.
- [34] https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_neurones_artificiels
- [35] <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/32/1/elmahdibrakni.pdf>
- [36] F. MEDJILI « Modélisation par Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et commande Prédicative non linéaire d'une station de production d'eau froide » mémoire de magister en automatique, université de Annaba 2010.
- [37] Lazhari Souissi, « Entraînement d'un réseau de neurones par algorithme génétique », mémoire de master, dept. Informatique, option: Image et vie artificielle. Université de Biskra.2020.
- [38] J. W. Summers, “A review of Vinyl technology”, Journal of Vinyl & Additive Technology, Vol. 3, N° 2, pp. 130-139, June 1997.
- [39] D. Braun, “Recycling of PVC”, Progress in Polymer Science, Vol. 27, pp. 2171-2195, 2002.
- [40] V. Babrauskas, “Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC insulated electrotechnical products”, Fire and Materials, Vol.30, Issue 2, pp. 151-174, March/April 2006.

- [41] P.M.R.Tendero,A.Jimenez, A. Greco, A. Maffezzoli, “ Viscoelastic and thermal characterization of cross-linked PVC”, European Polymer Journal, Vol. 42, Issue 4, pp.961-969, April 2006.
- [42]R. Bocaloglu, M. Fisch, “Degradation and stabilization of Poly(vinyl chloride). V.reaction mechanism of poly(vinyl chloride) degradation”, Polymer Degradation and Stability, Vol. 47, pp. 33-57, 1995.
- [43]A.Mohamed Nadia, W. SabaaMagdy, “Thermal degradation behaviour of Poly(Vinylchloride)-Poly(vinyl butyral) blends”, European Polymer Journal, Vol. 35, pp. 1731-1737, 1999.
- [44]A.Jiménez, L. Torre, J.M. Kenny, “Thermal degradation of poly(vinyl chloride) plastisols base on low-migration polymeric plasticizers”, Polymer Degradation andStability, Vol. 73, pp. 447-453, 2001.
- [45] E. Belhiteche, M.A. Handala, F. Zeboudj“Evaluation of surface degradation of PVC under electrical aging using Deilectric Spectroscopy, SEM and FTIR analysis”, 9thInternational Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15 - Versailles 21-25 June, 2015.
- [46] M. Nedjar, A. Boubakeur, A. Bérroual, M. Bournane, “Thermal aging of Polyvinyl Chloride used in electrical insulation”, Annales de Chimie, Science des Matériaux, Vol. 28, pp. 97-104, 2003.