

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De l'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté Des Sciences Et De La Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Mémoire de fin d'étude
Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : M2.Réseaux électriques

Thème :

**Prédiction des tensions seuils du SF₆ avec les
réseaux de neurones**

Présenté par :
-KHALFALLAH WARDA
-SOUILAH MERIEM

Encadré par :
Pr. LEMZADMI AHCENE

JUIN 2016



16/3345

16/3345

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ وَفَوْقَ كُلِّ ذِي عِلْمٍ عَلِيمٌ ﴾ ﴿٧٦﴾ يوسف.

Remerciement

C'est avec un grand plaisir que nous apportons ce modeste travail à tous ceux qui nous ont gratifiés de leur soutien et de leur confiance.

Louanges à dieu, qui nous donné vie et santé pour le parachèvement de ce modeste travail.

Notre remerciement à notre encadreur Pr. Lemzadmi qui a dirigée notre travail par ces conseils bénéfiques, pour son soutient et sa patience

Tous les enseignants du département de l'électronique et l'automatique

Nos familles, qui durant nos études, nous ont toujours donné la possibilité de faire ce que nous voulions et ont toujours croie a nous

Warda et Meriem





Dédicace

*Avant tous, je remercie le bon dieu de m'avoir mis sur le bon chemin
pour pouvoir réaliser ce travail*

A mon cher père qui m'a toujours aidé, et encouragé tout au long de ma vie.

*AU cristal de ma vie, la lune de mes nuits, le soleil de mes jours, et la
source d'amour à ma très chère mère.*

A mes frères « Hamza, Mohammed et son épouse Marwa ».

A mes soeurs bien aimées "Amina et Sara" .

A mes amies : « Rahma, Imen, Djazira, Nesrine, Zahra ,

Spécialement a mon cher binôme « Meriyouma »

Pour vous « Asma, Moufida et Rahima »

A tous ceux qui m'aiment et j'aime

WARDA



Je dédie ce travail à :

Celle qui ne pense qu'à moi ma très chère mère "FATIMA "

A celle qui m'encourage toujours ma chère mère "WARDA "

Celui qui n'a cesse de m'aider avec son indéfectible soutien mon chère père "IBRAHIM l'homme qu'il m'a donné le désir l'apprendre et mon deuxième père "AZIZ "

+ Spéciale dédicace à mon cher mari "ABDELHAKIM "

Mes deux très chers frère "ISSAM "et "GHANI "et leurs belles femmes

Mes très chères sœurs "CHAHRA", "SONIA", "DOUNIA", "SOUMIA", "WAHIDA", "MARWA", "TMEN", "RANDA " et leurs maris et leurs enfants ,

A mon binôme « WARDA »

A tous les amis spécialement "Tabouza "

Spécialement la section réseau électrique

MERIEM

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I

I.1.INTRODUCTION	1
I.2. Généralité	2
I.2.1.Grandeurs caractéristiques des milieux diélectriques	2
I.2.1.1.Rigidité diélectrique.....	2
I.2.1.2. Permittivité	2
I.2.1.3. Perte diélectrique $\tan \delta$	3
I.2.1.4.Polarisation.....	4
I.3. Les diélectriques.....	4
I.3.1. Les diélectriques gazeux.....	4
I.3.1.1. Caractérisation des décharges gazeuses.....	4
I.3.1.2. Principe de base et phénomènes d'amorçage en tension continue	6
I.3.1.3. Caractéristiques de la décharge	6
I.3.2. Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique	8
I.3.2.1. Influence de la distribution du champ électrique appliqué	8
I.3.2.2. Influence du type de tension appliquée	10
I.4. DIELECTRIQUES LIQUIDES	11
I.4.1. claquage dans les liquides.....	11
I.4.1.1. Mécanisme de claquage avec phase gazeuse	11
I.4.2.Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique	12
I.4.2.1.humidité	12
I.4.2.2.Pression hydrostatique	12
I.4.2.3.Distance entre électrodes	12

I.4.2.4. Température	12
I.4.2.5. Nombre de claquages	12
I.4.2.6. Influence des écrans	13
I.4.2.7. Durée d'application de la tension.....	13
I.5. LES DIELECTRIQUES SOLIDES	13
I.5.1. Conduction électrique dans les solides	13
I.5.2. Les pertes diélectriques	15
I.5.2.1. Permittivité relative.....	15
I.5.3. Mécanismes de claquage dans les diélectriques solides	17
I.5.4. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique	17
I.5.5. Vieillessement des isolants solides sous l'effet du champ	18
I.5.6. Tenue des matériaux isolants solides aux contraintes thermiques.....	19
I.5.7. L'arborescence	19
I.5.8. Vieillessement des isolants solides sous l'effet de l'environnement.....	20
I.5.9. Tenue des matériaux isolants solides aux contraintes mécaniques.....	20
I.6. Comparaison entre les diélectriques (gaz, liquide, solide).....	21
I.7. CONCLUSION	21
Chapitre II	
II.1. Généralités sur SF₆	22
II.1.1. Historique sur le SF ₆	22
II.2. Propriétés du SF₆	22
II.2.1. Propriétés physico-chimiques du SF ₆	22
II.2.2. Propriétés électriques, thermiques et biologiques	23
II.2.2.1: Rigidité diélectrique	23
II.2.2.2: Propriétés thermiques.....	24
II.2.2.3: Propriétés biologiques et environnementales	24
II.3: Les décharges couronnes dans le SF₆.....	26
II.3.1: Processus de calquage en champ fortement divergent	26

II.3.2: Détermination de la tension seuil de la décharge couronne dans le SF ₆	29
II.3.3: Facteurs influençant la tenue diélectrique du SF ₆	30
II.4. Les réseaux de neurones	31
II.4.1 Introduction	31
II.4.2. Historique	31
II.4.2.1. Les débuts	31
II.4.2.2. Les premiers succès	32
II.4.2.3. L'ombre	32
II.4.2.4. Le renouveau	32
II.4.2.5. La levée des limitations	33
II.4.2.6. La situation actuelle	34
II.4.3 Les neurones formels	34
II.4.3.1. Différents types de neurones	34
II.4.4. Les réseaux de neurones formels	36
II.4.4.1. Les réseaux de neurones non bouclés (statiques)	37
II.5. Perceptron multicouches (PMC).....	37
II.6. Propriétés des Réseaux de Neurones Formels	38
II.6. 1. Le parallélisme.....	38
II.6. 2. La capacité d'adaptation	38
II.6.3. La facilité de construction	38
II.7. Apprentissage d'un réseau de neurones	39
II.7. 1. Type d'apprentissage	39
II.7.1.1. Apprentissage supervisé	39

II.8. Validation et Tests	40
--	-----------

Chapitre III

III. Prédiction des tensions seuils par les réseaux de neurones	42
--	-----------

III.1. Technique expérimentale	42
---	-----------

III.2. Résultats et discussion	43
---	-----------

III.2.1. Caractéristiques courant-tension pour la SF₆ pur	43
---	-----------

III.2.2. Simulation des courbes U(I)	45
---	-----------

Conclusion générale

Liste des figures:

Chapitre I

Figure1: l'angle de pertes.....	3
Figure 2 : courbe de Pashen pour l'air montrant la variation de la tension de claquage en fonction de pd.....	6
Figure 3: caractéristique d'une décharge gazeuse.....	7
Figure 4 : avalanche électronique.....	8
Figure5 : la configuration plan-plan	9
Figure 6 : la configuration pointe positive plane à la terre	9
Figure 7 : conduction dans un fils de longueur l et section s.....	15
Figure 8 : conduction dans une plaque d'épaisseur e et de surface s.....	15
Figure 9 : Arborescence dans l'isolant d'un câble.....	19

Chapitre II

Figure 1 : structure moléculaire de l'hexafluorure de soufre.....	22
Figure 2 : décharge couronne continue en pointe anodique dans le SF ₆	27
Figure 3 : Tensions seuils de claquage et de décharges couronnes dans le SF ₆ en fonction de la pression et pour les différentes formes de tensions avec un champ fortement divergent.....	27
Figure 4: neurone formel.....	34
Figure 5 : Différentes fonctions d'activation.....	36
Figure 6 : Perceptron multicouche à une couche cachée.....	38
Figure 7: Organigramme de conception d'un réseau de neurones.....	41

Chapitre III

Figure 1: Dispositif de mesure pour la détermination des tensions seuils.....	42
---	----

Figure 2: Les caractéristiques des tensions seuils pour le SF_6 pur à différents valeurs de pression (P) en polarité négative.....	43
Figure 3: Les caractéristiques des tensions seuils pour le SF_6 pur à différents valeurs de pression (P) en polarité positive.....	44
Figure 4: Evolution de l'erreur pour le SF_6 pure à 2 Bars, en polarité négative.....	45
Figure 5 : Evolution de l'erreur moyenne de prédiction à 2 bars.....	46
Figure 6: Courbes U(I) mesurées et prédites pour SF_6 pur à 2Bars en polarité négative.....	46
Figure 7: Evolution de l'erreur moyenne de prédiction à 5 bars.....	47
Figure 8: Courbes U(I) mesurées et prédites pour SF_6 pur à 5Bars en polarité négative.....	47
Figure 9: Evolution de l'erreur moyenne de prédiction à 10 bars.....	48
Figure 10: Courbes U(I) mesurées et prédites pour SF_6 pur à 10 Bars en polarité négative.....	48
Figure 11: Les tensions seuils calculées par le modèle empirique de Malik et Quershi et celui de Kline comparées aux résultats obtenus par la prédiction des réseaux neurones pour le SF_6 pur.....	49

Liste des tableaux :

Chapitre I

Tableau 1: permittivité et rigidité diélectriques de quelques diélectriques usuels.....	21
---	----

Chapitre II

Tableau 1: Principales propriétés du SF_6	23
Tableau 2: Principaux sous-produits de décomposition du SF_6 , leur toxicité et leur pathologie.....	25
Tableau 3: Paramètres choisis.....	40

Introduction générale

La connaissance des propriétés électriques des matériaux diélectrique est d'une grande importance, particulièrement lors du choix des matériaux pour la conception d'un système donné. Il existe trois types d'isolants: isolants gazeux, isolants liquides et isolants solides.

Les isolants gazeux jouent un rôle très important en haute tension. L'utilisation de l'hexafluorure de soufre SF_6 a connu un accroissement très significatif dans la dernière décennie.

Ce travail est consacré à l'élaboration d'un programme de simulation basé sur les réseaux neurone pour la prédiction des tensions seuils des décharges couronnes dans le SF_6 pur.

Le travail se divise en trois chapitres et finalisé par une conclusion générale. Le premier chapitre donne un état de l'art sur les décharges électriques dans les différents diélectriques.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des décharges couronnes dans le SF_6 et une étude courte sur les réseaux de neurones artificiels.

Au troisième chapitre sont présentés les résultats de simulation comparés aux résultats de mesures.

Chapitre 1

Généralités sur les décharges électriques

I.1. INTRODUCTION :

La connaissance des propriétés électriques des matériaux pour les concepteurs des systèmes électriques ou autres est impérative. En effet, la considération des propriétés électriques est souvent très importante, particulièrement lors du choix des matériaux pour la conception d'un système donné. Le comportement électrique pour un grand nombre de matériaux est varié. Il existe trois types des isolants: gazeux, liquides et solides.

Selon l'application et l'environnement de travail auquel il est destiné. Certains matériaux doivent être de très bons conducteurs par contre d'autres, doivent être de très bons isolants (diélectrique).

Un diélectrique est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Les isolants sont utilisés pour :

- Assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés, protection des personnes et des équipements.
- Supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre.

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés des isolants et les paramètres qui ont une influence sur les phénomènes des décharges électriques.

I.2. Généralité

I.2.1. Grandeurs caractéristiques des milieux diélectriques

Les matériaux diélectriques sont caractérisés en particulier par la:

- rigidité diélectrique.
- permittivité diélectrique ϵ .
- Perte diélectrique $\tan \delta$.
- polarisation.

I.2.1.1. Rigidité diélectrique :

C'est la valeur maximum du champ électrique que le milieu diélectrique peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique ou le claquage.

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant: courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est percé: il y a rupture diélectrique ou claquage (destruction de l'isolant), irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale.

La rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension.
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère.
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

I.2.1.2. Permittivité :

Le constant diélectrique ou constante électrique, également nommé permittivité du vide ou encore permittivité diélectrique du vide, est une constant physique. Elle est notée par ϵ_0 .

Le constant diélectrique se définit comme le rapport entre la permittivité ϵ du matériau considéré et la permittivité du vide.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 C^2} \quad (I.1)$$

Où :

- μ_0 est la perméabilité dans le vide.
- C est la vitesse de la lumière dans le vide.

Dans le système d'unité SI ϵ_0 a pour valeur :

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

I.2.1.3. Perte diélectrique $\tan \delta$:

Est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite traversant l'isolant:

On a:

$$\tan \varphi = \frac{CU\omega}{\frac{U}{R}} = RC\omega$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} = \frac{1}{RC\omega}$$

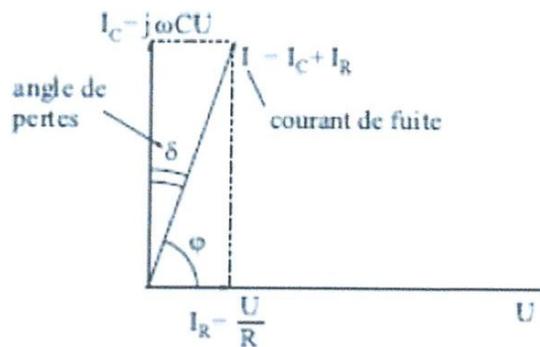


Figure1 :l'angle de pertes.

La valeur $\tan \delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique. L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant:

- bon isolant \rightarrow résistance d'isolement R élevée δ faible;
- mauvais isolant $\rightarrow R$ faible δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan \delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4} . $[\bar{I} - \bar{0I}]$.

I.2.1.4. Polarisation :

En soumettant le matériau à un champ électrique de tels dipôles peuvent être créés s'il existait déjà, cela peut relier l'amplitude de l'onde au dipôle créé via la notion de polarisabilité, qui est une caractéristique propre à chaque atome. Il est cependant impossible de mesurer de telles grandeurs microscopiques. On préfère utiliser une grandeur macroscopique, la polarisation, qui vaut la somme de tous les dipôles du matériau. Cette polarisation vient donc de différents effets physiques:

1. la polarisation électronique, toujours présente, est due au déplacement et à la déformation de chaque nuage électronique.
2. la polarisation atomique est due aux déplacements des atomes.
3. la polarisation d'orientation existe lorsque des dipôles déjà présents sont tous alignés entre eux. [I – 02]

La polarisation P est souvent proportionnelle au champ électrique E qui la crée (se cas est dit linéaire :

$$p = \epsilon_0 \chi E$$

ϵ_0 : la permittivité du vide

χ : la susceptibilité électrique du matériau

I.3. Les diélectriques

Il existe trois types d'isolants diélectriques: isolants gazeux, isolants liquides et isolants solides.

I.3.1. Les diélectriques gazeux :

Les principaux diélectriques gazeux sont: L'air, L'azote et L'hexafluorure de soufre...etc.

I.3.1.1. Caractérisation des décharges gazeuses

I.3.1.2. Principe de base et phénomènes d'amorçage en tension continue:

Pour obtenir des décharges dans un gaz, il faut appliquer un champ électrique entre les deux électrodes. En présence de champ électrique E, les électrons libres présents dans le gaz sont accélérés et deviennent assez énergétiques pour ioniser d'autres atomes, ce qui entraîne la production d'électrons supplémentaires qui sont à leur tour accélérés par le champ électrique, et ainsi de suite. Si la différence de potentiel est suffisamment élevée, c'est-à-dire

supérieure à un certain seuil, on aura une cascade de collisions : c'est le phénomène d'avalanche qui conduit à l'ionisation partielle du gaz qui devient conducteur, ce qui forme un plasma. Si l'on introduit un gaz entre une cathode soumise à une tension négative, et l'anode reliée à la masse, la probabilité d'ionisation par unité de longueur x sera proportionnelle au nombre de collisions provoquant une ionisation. On peut écrire [I-03].

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{U}{eE\lambda}\right) \quad (I.2)$$

Où :

α : facteur d'ionisation

λ : est le libre parcours moyen

E : le champ électrique

e : est l'énergie gagnée par l'électron entre les collisions (en eV)

U : est un potentiel effectif d'ionisation qui tient compte des effets des pertes d'ions.

Le terme exponentiel exprime donc la probabilité pour que l'électron provoque une ionisation.

On sait que le libre parcours moyen est inversement proportionnel à la pression p . On peut donc décrire le champ électrique E_d de la décharge au moyen de la formule suivante [I-02].

$$E_d = \frac{Ap}{(C + \ln(p.d))} \quad (I.3)$$

Où pd est le produit pression distance (Torr.cm), A et C sont des constantes qui dépendent du gaz.

La tension de claquage pour une tension continue U_c est en fonction du gaz utilisé de la pression (p) du gaz, et de la distance (d) entre la cathode et l'anode. Cette dépendance exprimée par la relation suivante [I-02].

$$U_c = \frac{C_1(p.d)}{C_2 + \ln(p.d)} \quad (I.4)$$

Avec C_1 et C_2 sont des constantes dépendantes de la nature du gaz.

En examinant la formule de la tension de la décharge, on constate que pour les larges installations c'est-à-dire pour des valeurs très élevées du produit pd , la tension de claquage est

proportionnelle directement ou inversement à pd . Cette dépendance est nommée loi de Paschen, qui reflète, en fait, la dépendance de la décharge lumineuse vis à vis des électrons secondaires.

Si la distance entre les électrodes est petite ou la pression est faible, les électrons secondaires émis de la cathode peuvent arriver à l'anode et provoquer un nombre insuffisant de collisions pour générer un plasma par les électrons secondaires. D'autre part, si la pression est trop élevée, les électrons ne peuvent pas avoir une énergie suffisante entre deux collisions successives pour produire un nombre suffisant d'ions. Si la distance entre la cathode et l'anode est très grande, seulement une petite fraction d'ions produits arrivera à la surface de la cathode et créera des électrons secondaires.

Aux deux points extrêmes de la valeur du produit pd , la probabilité d'ionisation et/ou la collection d'ions est petite et la tension de claquage exigée pour soutenir la décharge est trop élevée. La tension de claquage atteint un minimum entre les deux limites. Ce comportement est décrit par la courbe de Paschen qui est représentée dans la figure (2) qui reprend l'évolution de la tension d'amorçage en fonction du produit pd . [I-03].

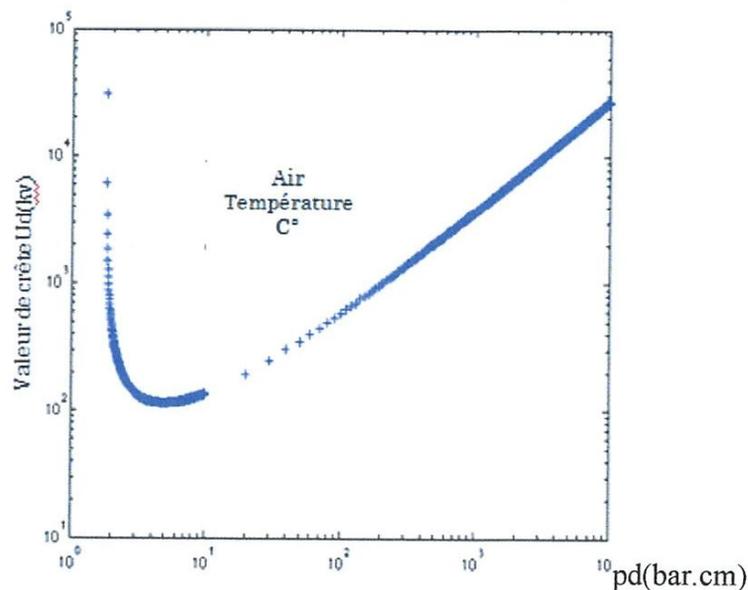


Figure 2: courbe de Paschen pour l'air montrant la variation de la tension de claquage en fonction de pd

1.3.1.3 Caractéristiques de la décharge

Le plasma est défini électriquement par une caractéristique tension courant représenté dans (Figure 3)

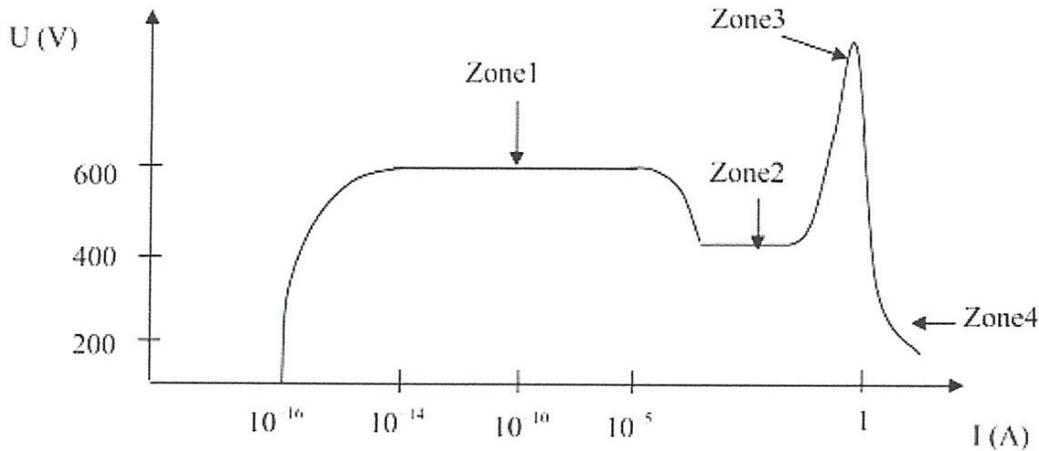


Figure3: Caractéristiques d'une décharge gazeuse

(1): décharge de Townsend.

(2): décharge normale.

(3): décharge anormale, c.à.d. dans c'est zone l'évolution est très rapide, (arc électrique)

(4): décharge d'arc.

Aux faibles courants, la décharge est dépendante, elle ne s'entretient que lorsqu'elle est exposée à un agent d'ionisation extérieure telle que les rayons cosmiques, la lumière ultraviolette, etc. Si la différence de potentiel entre les électrodes est suffisante, les électrons vont pouvoir créer des paires d'ion-électron, ces derniers pouvant à leur tour ioniser d'autres particules de gaz.

C'est l'effet d'avalanches électroniques. Le processus d'avalanche a pour conséquence d'augmenter fortement le courant de décharge, c'est la décharge de Townsend, et la distribution de courant est homogène. Lorsque le courant augmente, la tension entre les électrodes chute et la décharge devient luminescente sur les bords de la cathode, à cause de la désexcitation des atomes de gaz et de la neutralisation des ions. Si le courant croît jusqu'au point où la décharge devient luminescente sur toute la surface de la cathode, la tension entre les électrodes augmente et la décharge devient anormale. C'est ce mode anormal qui est utilisé en pulvérisation cathodique, d'une part en raison de la différence de potentiel élevée entre les électrodes et d'autre part à cause d'un courant de décharge important. Pour des valeurs de courant élevées, la cathode s'échauffe et émet spontanément des électrons qui peuvent provoquer des arcs (instabilité du plasma). Le courant électronique à une position z de l'intervalle inter-électrodes est donné par la relation suivante :

$$dIe(z) - \alpha Ie(z)dz \quad (I.5)$$

Le courant de Townsend est donné par la relation suivante :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (I.6)$$

Avec :

I_0 : Le courant électronique à la cathode (A) juste à l'application de la tension.

α : Le 1er facteur de Townsend.

γ : Le coefficient d'émission d'électrons secondaires.

d : La distance entre les deux électrodes (cm).

I.3.2. Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique :

Le vide (ou le gaz) est idéalement le meilleur isolant, mais ceci est affecté par plusieurs facteurs.

-L'avalanche électronique:

Considérons un système de deux électrodes planes et parallèles plongés dans un gaz isolant et entre lesquelles il y a un électron libre. Lorsqu'on applique une tension, l'électron est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique. Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons. Ce phénomène est caractérisé par un coefficient appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collisions au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive, à la création d'une avalanche électronique.

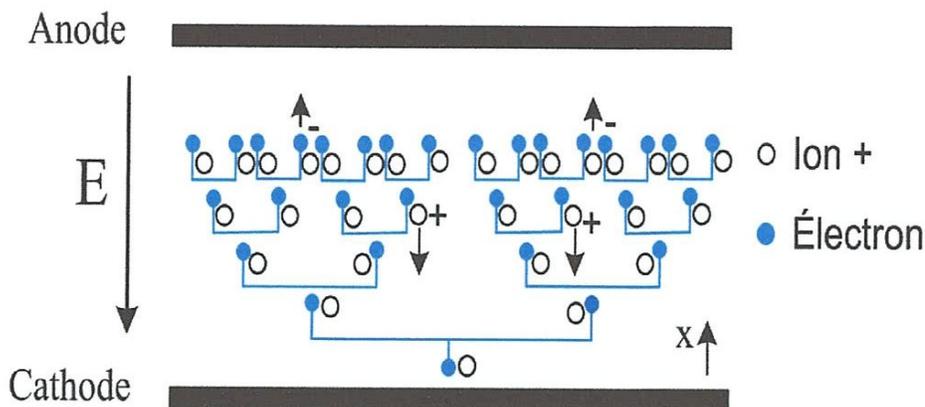


Figure 4: Avalanche électronique

I.3.2.1. Influence de la distribution du champ électrique appliqué :

Si les électrodes sont des plans parallèles, le champ est homogène. Si son intensité est telle

qu'un streamer prend naissance, son développement sera jusqu'à la cathode. C'est la condition de claquage de l'intervalle (d'air ou de gaz) se ramène à la condition d'apparition du streamer. Si les électrodes sont dissymétriques, par exemple une configuration pointe plan, les avalanches se développeront préférentiellement dans la région de fort champ c'est-à-dire près de la pointe. Si le streamer prend naissance il se propagera tant que le champ électrique total dans la région active permet de reproduire des avalanches secondaires.

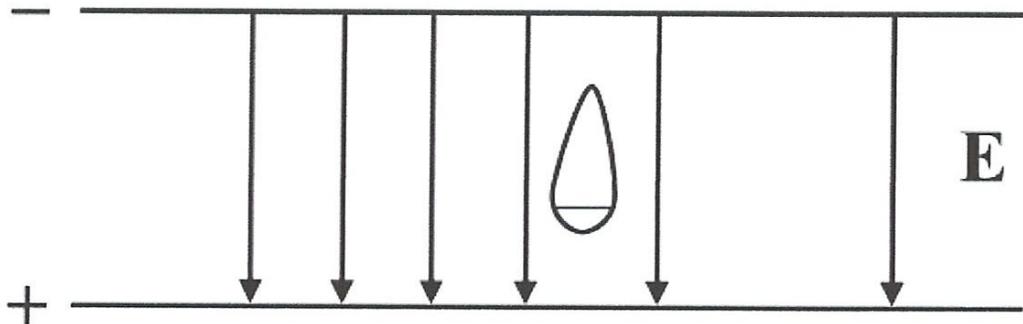


Figure 5: La configuration plan-plan

les lignes de champs sont parallèles et le champ est parfaitement homogène dans l'espace inter électrodes. Dès qu'un streamer prend naissance il se propage jusqu'à l'anode.

Si la pointe est portée à une tension positive par rapport au plan, les avalanches se développent vers la pointe et le streamer, en sens inverse vers le plan.

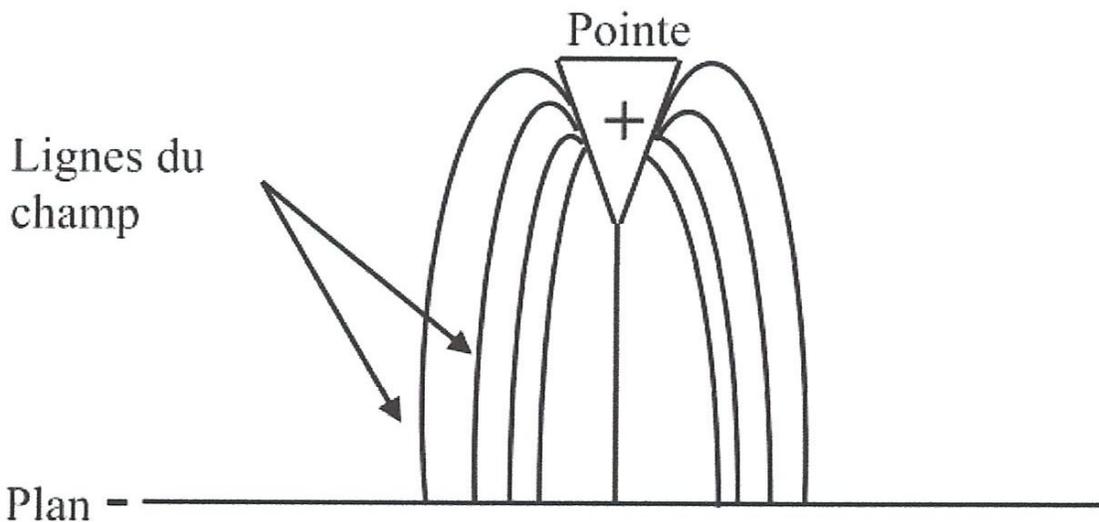


Figure 6: La configuration pointe positive plane à la terre

Les lignes de champ montrent la dissymétrie du champ électrique entre électrodes.

Si la pointe est à un potentiel négatif, les avalanches s'éloignent de la pointe et les streamers aussi. Car la tête de l'avalanche dans ce cas est chargée par les électrons qui ont une vitesse plus grande que celle des ions qu'ils ont laissés derrière eux.

I.3.2.2. Influence du type de tension appliquée

La forme de la tension appliquée est importante pour décrire le déclenchement du streamer. Elle peut être continue (un échelon), alternative ou une rampe. Raisonons d'abord dans la configuration pointe positive plan à la masse pour laquelle les mécanismes sont mieux connus.

A- en tension continue

On peut définir un niveau de tension minimum qui correspond à l'apparition du premier streamer. Si ce niveau est appliqué ou même dépassé, un streamer se développe. S'il atteint le plan, un court-circuit limité par le circuit extérieur prend place. Si le champ n'est pas suffisant pour que le streamer traverse tout l'intervalle inter électrode, la partie "passive" a pour effet de réduire le champ au voisinage de l'électrode privant tout phénomène d'ionisation. Les processus de recombinaison et de dérive et de diffusion vont dégager petit à petit le voisinage de la pointe. [I -04]. Le champ électrique augmente et les conditions d'initiation d'avalanche et de streamer réapparaissent. Le résultat est une succession de petites décharges streamer à fréquence régulière dépendant du niveau de la tension. Ce streamer porte aussi le nom de "dard".

B- en tension alternative (50 ou 60 Hz), les processus sont identiques car la fréquence de la tension appliquée est très inférieure à celle des streamers. La fréquence de répétition des couronnes est du domaine de l'audible. C'est précisément les bourdonnements que l'on entend sous les lignes HT. Dans ce cas, les streamers se développent tout autour du câble HT et on parle de "décharge couronne".

Il existe d'autres paramètres qui agissent sur le claquage dans les gazes nous citons quelques uns

- Métal des électrodes.
- Contamination extérieure.
- Température de l'intervalle.
- Pression du gaz.

I.4. DIELECTRIQUES LIQUIDES :

I.4.1. claquage dans les liquides :

Les principaux diélectriques liquides sont: Le pyralène, les huiles minérales, les huiles végétales et l'eau pure. Les phénomènes de décharges dans les diélectriques liquides restent jusqu'à ce jour moins connus par rapport aux gaz et solides malgré l'existence d'une importante quantité d'informations.[I -05]. Cela est dû principalement à l'intervention d'une multitude de facteurs physicochimiques, thermiques, électroniques, hydrodynamiques..., lors de l'apparition d'une décharge (phase de génération) ou durant la phase de propagation dénommée "streamers" jusqu'au claquage. De nombreux chercheurs ont tenté d'appliquer aux liquides les théories proposées pour les gaz et les solides.[I -05].

Il existe deux principaux mécanismes pouvant être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides .En plus de ces mécanismes, le claquage peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures en suspension dans le diélectrique liquide. On parle dans ce cas de mécanisme de claquage par pont. Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui concernant les huiles de transformateur. Ces derniers sont soumis à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures nous citons les différents mécanismes de claquage dans les liquides.

I.4.1.1. Mécanisme de claquage avec phase gazeuse :

Dans les liquides ultra purs, et en géométrie pointe plan, sous tension continue, il a été observé, qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan.[I -05] Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation des bulles, soit de la cavitation. Dans ce mécanisme il y'a deux sous mécanismes :

- **Mécanisme thermique:** D'après Watson et Sharbaugh, une bulle de vapeur est générée dans le liquide par une injection de courant à partir d'aspérités sur la cathode. Ce courant a la forme suivante :

$$I = AV^n \quad (I.7)$$

Avec :

A: cste

$$1.5 \leq n \leq 2$$

V : La tension

- **Mécanisme de cavitation** : Si un liquide est chauffé à pression constant (ébullition), ou s'il est soumis à une dépression à température constante (cavitation), il apparaît des bulles ou cavités de vapeur ou de mélange de vapeur et gaz. La cavitation désigne la séquence de formation, d'expansion de la cavité Elle peut se produire dans le liquide ou sur les parois.

[I -04].

I.4.2. Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique :

Il existe plusieurs facteurs qui ont une influence sur la valeur du champ disruptif dans les liquides. Parmi ces facteurs, les plus importants sont les impuretés et les gaz dissous dans le liquide, la pression hydrostatique, la configuration des électrodes, la température, la durée d'application de la tension et l'état antérieur du liquide [I -05].

I.4.2.1. humidité :

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier.

I.4.2.2. Pression hydrostatique :

L'augmentation de la pression hydrostatique améliore la rigidité diélectrique du liquide.

I.4.2.3. Distance entre électrodes :

En augmentant la distance entre électrodes, la tension de claquage augmente. Dans le cas de champ électrique non uniforme lorsque la tension appliquée dépasse un certain seuil, l'effet de Couronne apparaît (formation de streamers).

I.4.2.4. Température :

L'influence de la température est double. En augmentant la température, la concentration de gaz et de l'humidité diminue dans le liquide. Cependant, les conditions pour avoir un claquage thermoélectrique s'améliorent. Cette influence de double effet, fait apparaître un maximum local dans la caractéristique représentant la variation de la tension de claquage en fonction de la température.

I.4.2.5. Nombre de claquages :

Il a été observé par plusieurs chercheurs [I -05], que la tension de claquage de l'huile, dans un système de configuration donnée, augmentait en fonction du nombre d'essais, restait ensuite constante et puis diminuait. Le nombre d'essais variait de 20 à 40. Ceci peut être

expliqué par l'élimination des bulles de gaz par les premiers claquages, cependant des claquages répétés et nombreux détériorent le liquide.

I.4.2.6. Influence des écrans :

Pour améliorer la rigidité diélectrique d'un système d'isolation, soit qu'on recouvre les électrodes avec une couche mince isolante, soit qu'on introduit une barrière isolante entre les électrodes. Il existe une position optimale de la barrière dans l'intervalle, pour laquelle la rigidité du système est la plus élevée. Dans le cas du système pointe plan, l'augmentation est observée dans les cas de la pointe sous haute tension de polarité positive ou alternative 50Hz, lorsque la barrière est située à proximité de la pointe.

I.4.2.7. Durée d'application de la tension :

Si la durée d'application de tension diminue, la tension de claquage augmente. Plus-la durée d'application augmente, plus l'effet des différentes impuretés se fait ressentir et la tension de claquage diminue. Pour les temps inférieurs à 10 μ s, le claquage a un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique.

I.5. LES DIELECTRIQUES SOLIDES

Les principales décharges solides sont: Le verre, la céramique, le polyéthylène, le polypropylène, le mica, la bakélite et le téflon ...etc.

I.5.1. Conduction électrique dans les solides

Les notions de résistance et de résistivité, qui sont généralement bien définies pour les conducteurs, peuvent être extrapolées aux matériaux isolants avec toutefois des spécificités que nous allons étudier. Lorsque l'on applique une tension continue à une éprouvette de matériau isolant, celui-ci n'étant pas parfait est traversé par un courant que l'on peut mesurer. Il est donc possible de déterminer une résistance. Dans certaines conditions, on peut alors calculer une résistivité qui présente théoriquement l'avantage sur la résistance de ne pas dépendre de la géométrie de l'éprouvette et des électrodes utilisées [I -04]. Rappelons d'abord ce qui se passe pour un conducteur. Un fil métallique de section s et de longueur l est traversé par un courant I lorsqu'on lui applique (avec certaines précautions non détaillées ici) une différence de potentiel V (figure 1.5). La résistance R du fil se déduit de la loi d'Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{I. 8})$$

La résistivité ρ du métal constituant le fil est donnée par la formule :

$$\rho = \frac{R.s}{l} \quad (\text{I.9})$$

ρ Est de l'ordre du ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$) pour les métaux les plus conducteurs. La résistivité d'un métal est une caractéristique intrinsèque qui dépend faiblement de son état métallurgique et des paramètres D'environnement à l'exception généralement de la température. Examinons, le cas d'une éprouvette de matériau isolant qui se présente non sous forme d'un fil, mais plutôt sous la forme d'une plaque d'épaisseur e , portant sur ses faces opposées des électrodes de surface S (figure1.6) On retrouve la résistivité de l'isolant en remplaçant la longueur du fil conducteur par l'épaisseur (e) de la plaque isolante et sa section s par la surface (S) des électrodes. La résistance de cette éprouvette vaut donc est donnée par (I.8).

Cette résistance porte en fait le nom de résistance d'isolement. On pourrait de la même manière calculer la résistivité de ce matériau en appliquant la formule précédente :

$$\rho = \frac{R.S}{e} \quad (\text{I.10})$$

Cela n'aurait aucun intérêt car, dans ce cas, (ρ) n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau mesuré. On peut s'en apercevoir par exemple en faisant varier les conditions d'environnement, notamment l'humidité relative de l'air. On constate alors que cette résistivité varie considérablement (plusieurs ordres de grandeur). La raison en est que, dans cette expérience, le courant circule principalement dans un film à la surface du matériau constitué essentiellement d'humidité adsorbée et contenant des impuretés ionisées. Il existe une autre différence majeure, de ce point de vue, entre métal et isolant: il s'agit de l'ordre de grandeur du courant à mesurer dans le cas de l'isolant qui s'exprime en nano ampères, pico ampères. La mesure de courants aussi faibles est difficile et nécessite des appareils et des techniques de mesure très spécifiques. Pour les matériaux isolants, on est de ce fait amené à définir plusieurs types de résistances (et de résistivités), par exemple:

- la résistance transversale (ou volumique)
- la résistance superficielle (ou de surface)

En général, ce courant passe essentiellement dans une couche superficielle de l'éprouvette ainsi que dans le dépôt d'humidité et d'impuretés superficielles, mais il comprend également une composante circulant dans le volume du matériau.

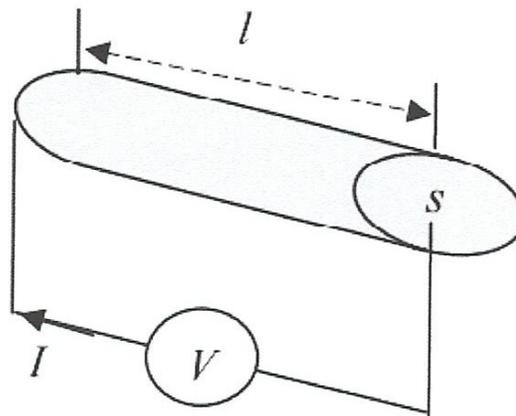


Figure7 : Conduction dans un fil de longueur l et de section s

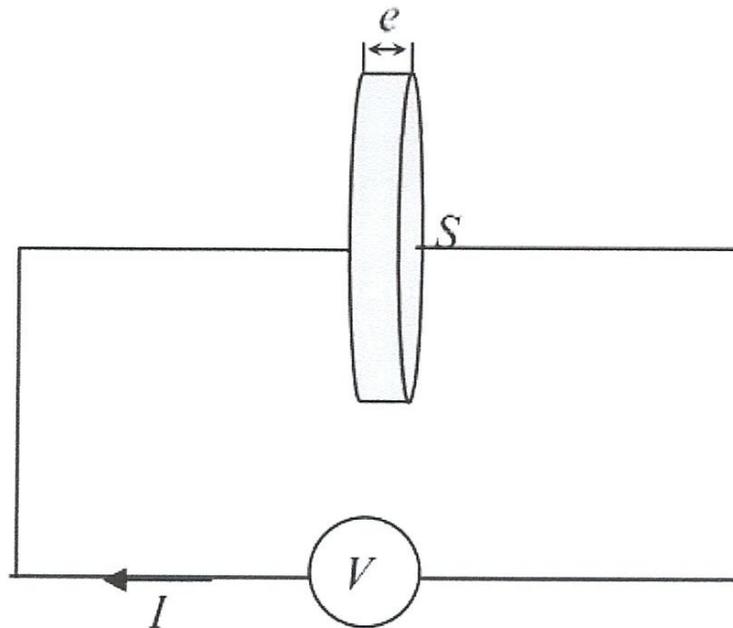
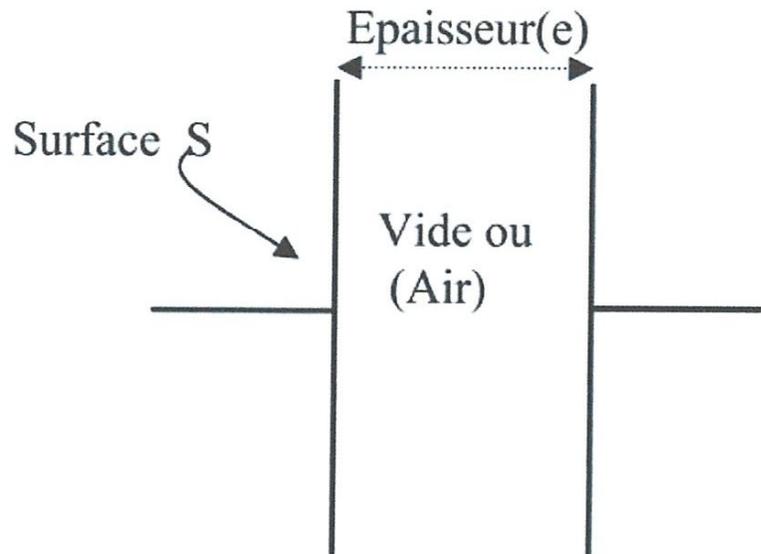


Figure 8: Conduction dans une plaque d'épaisseur e et de surface S

I.5.2. Les pertes diélectriques

I.5.2.1. Permittivité relative

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :



Sa capacité est :

$$c_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{I.11})$$

Où $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ est la permittivité absolue du vide (ou de l'air). Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$c = \varepsilon_r c_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{I.12})$$

La **permittivité relative** est définie par le rapport :

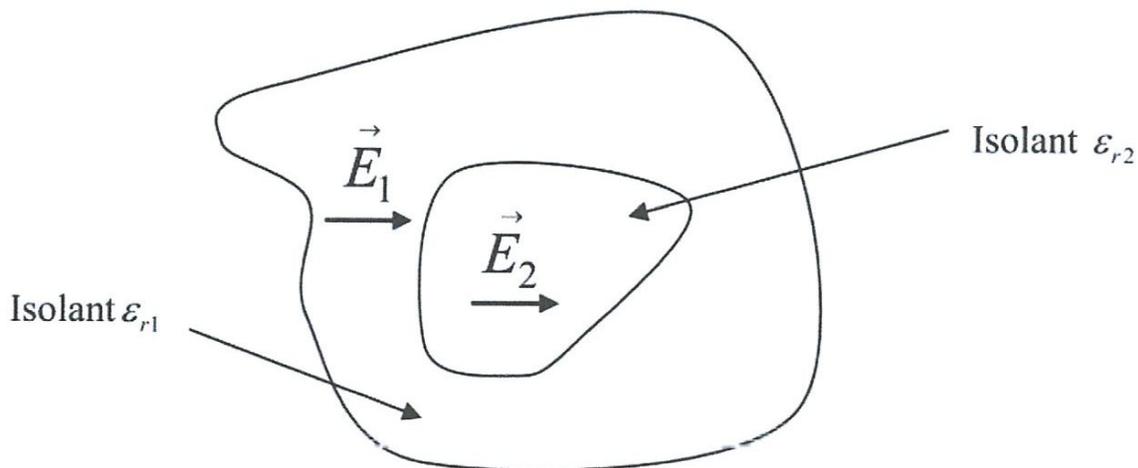
$$\varepsilon = \frac{c}{c_0} \quad (\text{I.13})$$

La **permittivité absolue** est :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{I.14})$$

Pour l'air ou le vide $\varepsilon_r = 1$. Pour tous les autres isolants $\varepsilon_r > 1$.

Dans un isolant, le champ électrique est inversement proportionnel à la permittivité :



On a la relation suivante :

$$\varepsilon_{r1} \cdot E_1 = \varepsilon_{r2} \cdot E_2 \quad (I.15)$$

I.5.3. Mécanismes de claquage dans les diélectriques solides

Le claquage est l'aboutissement d'une série de processus complexes et interactifs. Assez souvent, l'un des mécanismes est prédominant. On distingue le claquage intrinsèque du matériau qui est lié à des phénomènes électroniques, thermiques ou mécaniques et le claquage pratique qui survient au voisinage d'un défaut ou par suite d'une dégradation progressive du matériau.

Parmi les types de claquages on cite :

-claquage thermique : la circulation des courants dans le matériau isolant a pour conséquence un transfert d'énergie qui chauffe le matériau. Cet échauffement doit être compensé par les pertes thermiques par conduction dans le matériau pour que l'équilibre soit conservé.

-claquage électronique : deux grandes théories s'opposent dans le domaine du claquage électronique, les théories collectives et la théorie de l'avalanche. Pour cette dernière elle suppose qu'un électron est présent à l'origine dans le matériau (rayon cosmique par exemple). Cet électron produit une ionisation par collision qui entraîne une avalanche. On estime généralement le nombre d'électrons nécessaires pour produire une avalanche suffisamment destructive à (10^{12}) , ce qui correspond 40 générations de collision. [I -04]

-claquage électromécanique : cette théorie de claquage prend en compte l'effort électrostatique qui tend à rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cet effort comprime l'isolant solide placé entre deux électrodes. Le

claquage survient lorsque cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module de Young. On rencontre ce type de claquage principalement dans les polymères thermoplastiques [I -04].

I.5.4. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique

Un très grand nombre de paramètres influent sur la rigidité d'un diélectrique solide. Nous n'en citerons ici que quelques-uns.

- tension appliquée
- épaisseur et homogénéité de l'éprouvette
- température
- caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant

On trouve à l'annexe un tableau qui contient quelques valeurs de rigidité électriques des matériaux isolants.

I.5.5. Vieillessement des isolants solides sous l'effet du champ

L'application d'un champ électrique très élevé sur un isolant conduit au claquage instantané du matériau. Cependant, l'application d'un champ électrique inférieur au champ disruptif peut entraîner une dégradation progressive du matériau qui se termine généralement par un amorçage destructif et irréversible.

Divers types de dégradation peuvent se présenter suivant les conditions d'environnement et les directions relatives du champ électrique par rapport à la surface du matériau. Dans un premier groupe, la contrainte électrique est relativement faible, appliquée surtout parallèlement à la surface du matériau, et les conditions ambiantes jouent un rôle important par la présence d'humidité ou l'existence d'étincelles ou d'arcs. Il s'agit des phénomènes dits de cheminement.

Dans un second groupe, la direction du champ électrique est perpendiculaire à la surface du matériau et la dégradation s'opère sous l'effet de décharges partielles externes ou internes, ou encore d'arborescences. La dégradation d'un isolant solide sous l'action des décharges partielles se produit aussi dans le cas où, à l'intérieur ou à la surface d'une isolation composite, le champ électrique disruptif est localement atteint sur une partie de son trajet. Généralement, ce phénomène affecte la phase gazeuse (ou parfois liquide) dont la permittivité et la rigidité diélectrique sont simultanément plus faibles que celles de l'isolant solide. L'ensemble de l'isolation composite peut ainsi supporter sans claquage un champ électrique élevé mais à chaque alternance (ou périodiquement dans le cas d'une tension continue

appliquée) se produisent de petits amorçages qui provoquent une érosion progressive de l'isolant solide. [I -04]

I.5.6. Tenue des matériaux isolants solides aux contraintes thermiques

L'une des contraintes les plus importantes auxquelles sont soumis les matériaux isolants dans les matériels électriques est, après la contrainte électrique, celle qui résulte des échauffements.

L'effet de la contrainte thermique revêt deux aspects :

- le premier concerne le comportement instantané des isolants aux températures élevées ;
- le second est relatif à la dégradation qui s'opère progressivement au cours du temps et affecte leur comportement à long terme.

Les principales caractéristiques thermiques des isolants sont donc généralement assez différentes suivant la catégorie à laquelle ceux-ci appartiennent. Parmi les caractéristiques thermiques, le coefficient de dilatation thermique linéaire, la conductivité thermique et la capacité thermique.

I.5.7. L'arborescence

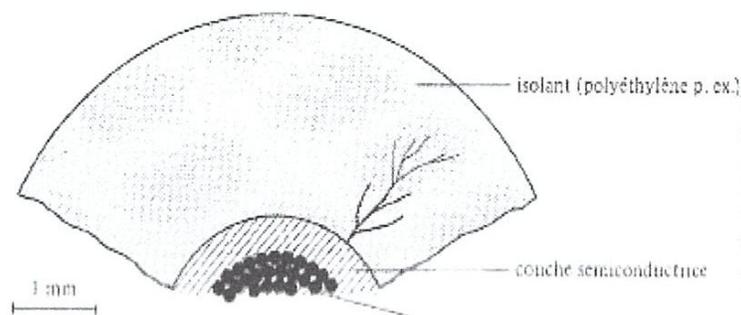


Figure 9 : Arborescence dans l'isolant d'un câble

De telles réductions de E_c se manifestent par exemple quand l'isolant présente des défauts d'homogénéité, cavités, inclusions de particules étrangères etc.. Les décharges partielles prenant naissance au voisinage de ces défauts dès que le champ est suffisant peuvent, par érosion, fusion localisée, transformations chimiques induites ou autres processus, créer dans l'isolant des réseaux de canaux plus ou moins conducteurs, appelés arborescences (figure9) en raison de leur ressemblance avec les branches d'un arbre. Les arborescences croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leur taille est suffisante. La présence d'humidité dans certains polymères semble favoriser l'apparition et la croissance des arborescences

I.5.8. Vieillissement des isolants solides sous l'effet de l'environnement

Le problème de l'évaluation du vieillissement des matériaux isolants solides sous l'effet des contraintes d'environnement, est traité dans une norme française [I -04], qui peut également s'appliquer à des matériels de petite taille, met en œuvre l'effet du rayonnement solaire et des intempéries (humidité, pluie, chaleur, froid, sable,...). L'essai consiste à soumettre des éprouvettes du matériau à un cycle combiné de contraintes climatiques.

I.5.9. Tenue des matériaux isolants solides aux contraintes mécaniques

Il est utile de rappeler que, dans de nombreux cas, les défaillances électriques sont initiées par des défaillances d'ordre mécanique [I -04]. Une isolation satisfaisante doit donc être constituée de matériaux dont les caractéristiques mécaniques sont suffisantes pour leur permettre de ne pas être détériorés par leur mise en œuvre puis de supporter sans défaillance les diverses contraintes mécaniques rencontrées en service (efforts dus aux dilatations, vibrations, chocs thermiques, etc.). Il est donc d'une importance capitale de choisir des matériaux isolants dont les caractéristiques mécaniques sont suffisantes pour l'emploi considéré. Parmi les caractéristiques mécaniques les plus importantes pour les matériaux utilisés dans la construction électriques

- Contrainte de rupture et allongement à la traction.
- Contrainte de rupture en compression
- Contrainte de rupture en flexion.
- Résistance au choc.
- Dureté.

I.6. Comparaison entre les diélectriques (gaz, liquide, solide)

<i>Matériau</i>	<i>classe</i>	<i>conditions</i>	<i>Permittivité ϵ_r</i>	<i>Rigidité E_c (Mv/m)</i>
Vide	Gaz	0°C, 1Atm	1	3
Air	Gaz	0°C, 1Atm	1.00069	.....
Anhydride chlorhydrique (HCL)	Gaz	0°C, 1Atm	1.0046	.....
Eau (H ₂ O)	Gaz	110°, 1Atm	1.0126	.....
Eau (H ₂ O)	liquide	20°C	80	.....
Benzène (C ₂ H ₂)	liquide	20°C	2.28	.....
Ammoniac (NH ₃)	liquide	- 34°C	22	.....
Huile de transformateur	liquide	20°C	2.24	15
Chlorure de sodium (Na cl)	cristal	20°C	6.12	.....
Quartz (SiO ₂)	cristal	20°C	4.27-4.34	8
Soufre S	solide	20°C	4	.....
Polyéthylène	solide	20°C	2.25-2.3	18
Polystyrène	solide	20°C	2.45-2.65	16-28
Polypropylène	//	//	2.2-2.3	20-26.4
porcelaine	//	//	6-8	16
Papier	//	//	2	15
PVC	//	//	5-9	11-32
Néoprène	//	//	4.1	12
Verre	//	//	4	16
Mica	//	//	6	35
Caoutchouc	//	//	4	15
Bakélite	//	//	5-6	24
Céramique (titanate de baryum)	//	//	.....	40
Téflon	//	//	2.1	60/80

Tableau1 : permittivité et rigidité diélectriques de quelques diélectriques usuels.

I.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu général sur les catégories des diélectriques et les divers paramètres influant directement ou indirectement sur l'état d'isolement d'un diélectrique, peut nous aider de faire la sélection des bons isolants à partir de leurs caractéristiques électriques physico-chimiques, mécaniques.

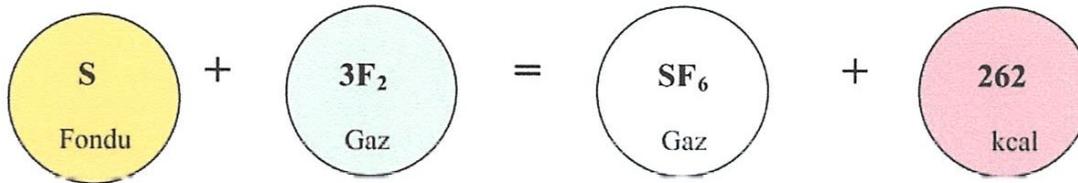
Chapitre 2

Décharges couronnes dans le SF₆

II.1. Généralités sur SF₆ :

II.1.1. Historique sur le SF₆ :

Le SF₆ fut fabriqué pour la première fois en 1900 par H. Moissan et P. Lebeau [II -1] à partir du fluor et du soufre par la réaction suivante:



Les premières recherches d'envergure furent menées en 1939 par H.G. Pollak et F.S. Cooper [II-2] qui étudièrent le comportement électrique du SF₆ en champ divergent sous tension continue. Au cours des années suivantes les recherches portèrent principalement sur la stabilité chimique du gaz soumis à des décharges électriques. Ce n'est qu'aux années cinquante qu'on s'est intéressé au SF₆ comme un gaz isolant dans le domaine de l'électrotechnique de haute tension.

II.2. Propriétés du SF₆ :

II.2.1. Propriétés physico-chimiques du SF₆ :

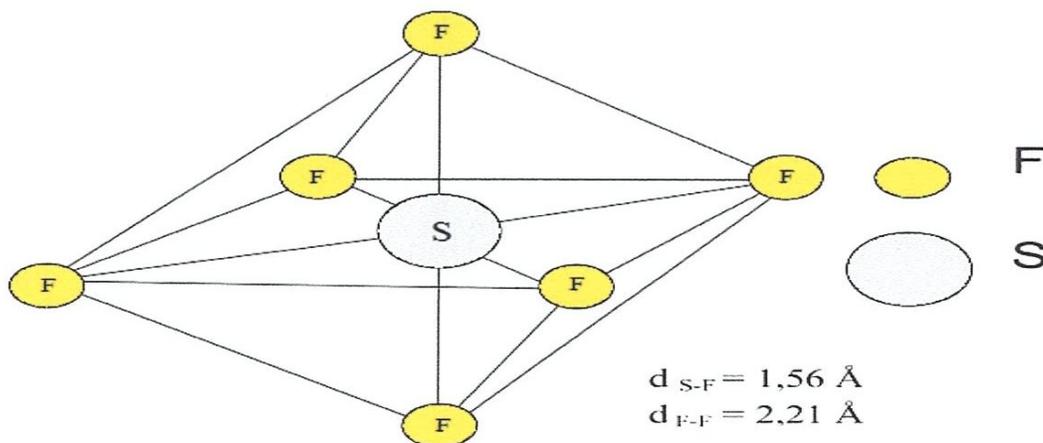


Figure1: Structure moléculaire de l'hexafluorure de soufre

La structure moléculaire du SF₆ est à l'origine de l'excellente stabilité thermique, son électronégativité lui permet de neutraliser les électrons libres présents dans le milieu. Dans son état normal il est chimiquement neutre, non-toxique, et il est non-inflammable. Le SF₆ a une capacité remarquable de s'auto-cicatriser après une rupture de l'intervalle, il est incolore, inodore et il est très compatible avec les matériaux utilisés dans l'industrie de l'électrotechnique

Principales propriétés du SF₆

<i>Masse molaire moléculaire</i>	146,050418 g.mol ⁻¹
<i>Masse volumique</i>	6,602 kg.m ⁻³ à T=273,15 K et P=101,3 kPa
<i>Point de sublimation</i>	- 63,8°C à P=101,3 kPa
<i>Point de fusion</i>	- 50,5°C à P=101,3 kPa
<i>Chaleur spécifique</i>	C _p =0,159kcal.kg ⁻¹ .K ⁻¹ à T=298,15K et P=101,3 kPa
<i>Entropie</i>	S°=291,535 J.K ⁻¹ .mol ⁻¹ à T=298,15 K
<i>Enthalpie de formation</i>	ΔH _f ^o = - 1220,473 kJ.mol ⁻¹ à T=298,15 K ΔH _f ^o = - 1206,501 kJ.mol ⁻¹ à T=0 K
<i>Conductivité thermique à P=101,3 kPa</i>	κ=2,88.10 ⁻⁵ cal.cm ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹ à T=273,15 K κ=3,14.10 ⁻⁵ cal.cm ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹ à T=288,15 K κ=3,80.10 ⁻⁵ cal.cm ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹ à T=323,15 K κ=4,72.10 ⁻⁵ cal.cm ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹ à T=373,15 K
<i>Permittivité relative à P=94,4 kPa</i>	ε _r =1,00191 à T=298,15 K

Tableau 1: Principales propriétés du SF₆

II.2.2. Propriétés électriques, thermiques et biologiques:

II.2.2.1. Rigidité diélectrique :

La « rigidité diélectrique » d'un gaz est la capacité de ce dernier à résister à une tension élevée. Ainsi, pour un gaz à une pression donnée, il existe une valeur de la tension, dite tension disruptive, au-dessous de laquelle le gaz reste isolant et au-dessus de laquelle il devient conducteur. Pour tester la rigidité diélectrique d'un gaz, on le place entre deux conducteurs séparés d'une petite distance (par exemple: deux sphères conductrices identiques

peu écartées formant un spintermètre). On fixe la pression et on augmente progressivement la tension dans le dispositif. On constate que, pour une tension donnée, le gaz passe de l'état isolant à celui de conducteur et un courant circule entre les deux éléments conducteurs formant le système. Plus cette tension de claquage est élevée et plus le gaz en question est un bon diélectrique. La rigidité diélectrique du SF₆ est 2 à 3 fois supérieure à celle de l'air à pression identique ceci étant dû à sa forte aptitude à capter des électrons; de plus, sa section efficace élevée (de l'ordre de la dimension de la molécule) permet de ralentir par collision les quelques électrons libres subsistant dans le gaz ce qui va les empêcher d'être trop rapidement accélérés sous l'action du champ électrique et va ainsi retarder la formation des électrons germes de la décharge. La bonne rigidité diélectrique du SF₆ gazeux peut donc s'expliquer par ses multiples possibilités d'arrêt des électrons énergétiques ainsi que par sa faculté de les fixer à basse énergie en formant des ions lourds retardant l'apparition du claquage.

II.2.2.2. Propriétés thermiques :

Prenons le cas d'une différence de température entre deux points, l'agitation thermique des particules conduit via les collisions binaires à un transfert d'énergie de la population « chaude » à la « froide ». Le phénomène s'arrête lorsque la température est uniforme ; il y a bien eu transfert de chaleur. Le coefficient de conductivité thermique κ est ainsi défini par la relation entre le flux de chaleur et le gradient de température [II-3] :

$$\vec{Q} = -\kappa \vec{\nabla} T \quad \text{ou} \quad \vec{Q} \text{ est le flux de chaleur} \quad (\text{II.1})$$

et $\vec{\nabla} T$ est le gradient de température

Le transfert thermique d'un bon isolant gazeux doit être tel que la chaleur créée après passage du courant dans un dispositif soit facilement évacuée : c'est le cas pour le SF₆

II.2.2.3. Propriétés biologiques et environnementales:

La Valeur Moyenne Exposition (V.M.E.) correspond à la quantité de gaz qui permet des expositions de 8 heures par jour, 5 jours par semaine, sans effet chez l'individu : elle est mesurée en ppmv. Comme sous l'effet de contraintes électriques, le SF₆ est susceptible de se décomposer en sous produits biologiquement dangereux, le tableau 1 indique les effets connus sur l'homme et la V.M.E. de certains sous-produits [II-4] :

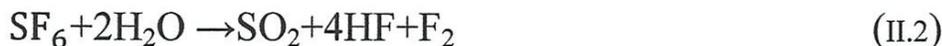
Tableau 2: Principaux sous-produits de décomposition du SF₆, leur toxicité et leur pathologie [Bo-1, Sa-1]

	NOM	TOXICOLOGIE	V.M.E. (ppm,)
SF ₆	Hexafluorure de soufre	Asphyxiant à concentration élevée par déplacement de l'oxygène. inodore, peu toxique et non agressif	1000
SO ₂ F ₂	Fluorure de sulfuryle	Convulsifiant: blocage irréversible des muscles respiratoires (diaphragme). Inodore mais se forme avec d'autres gaz à odeur caractéristique	5
SOF ₂	Fluorure de thionyle	Agressif pulmonaire: œdème aigu du poumon Irritation des yeux Odeur âcre et nauséuse	0,63
S ₂ F ₁₀	Décafluorure de disoufre	Agressif pulmonaire (plus toxique que le phosgène)	0,01
SF ₄	Tétrafluorure de soufre	Agressif pulmonaire: difficultés respiratoires et irritation des muqueuses Odeur piquante décelable à faible concentration	0,1
SOF ₄	Tétrafluorure de thionyle	Agressif pulmonaire	0,63
SO ₂	Anhydride sulfureux	Irritant violent Odeur suffocante: irrespirable	2
HF	Acide fluorhydrique	Irritant	3

Les caractéristiques ci-dessous constituent des informations sur les propriétés environnementales du SF₆

Solubilité dans l'eau : le coefficient de solubilité (dit de Bunsen) correspond au volume de gaz à 273,15 K et 101,3kPa dissous par unité de volume de solvant à la température de l'expérience sous une pression partielle de ce gaz de 101,3 kPa. Pour le gaz SF₆ à 293,15 K :
Coefficient de Bunsen =0,0056

Stabilité thermique : jusqu'à T=773,15 K à P=101,3 kPa. Cette valeur est due à la configuration symétrique de la molécule de SF₆, très stable et avec des liaisons chimiques saturées. La décomposition thermique du SF₆ peut cependant survenir à partir 200°C au contact de certains matériaux (alliages au silicium par exemple) ; elle sera facilitée par la présence d'humidité et conduira à la formation de SO₂ et HF suivant la réaction [Su-1] :



Absorption dans l'infrarouge : contribution à l'effet de serre. Le SF₆ absorbe bien les radiations IR particulièrement à des longueurs d'onde de l'ordre de 10,5 μm et sa durée de vie dans l'atmosphère est au moins égale à 650 ans [Moo-1].

Cette longue durée de vie et sa forte capacité d'absorption dans l'infrarouge font du SF₆ un des principaux gaz à effet de serre même si sa participation relative reste pour l'instant faible. Le SF₆ peut donc présenter à terme un problème de pollution important que l'on cherche à réduire notamment en le mélangeant à d'autres gaz (N₂, CF₄, CO₂). [Ch-1]

II.3. Les décharges couronnes dans le SF₆:

II.3.1. Processus de calquage en champ fortement divergent

Les équipements de haute tension utilisant le SF₆ comme isolant sont fabriqués sans volume critique pour les différents types d'impulsions. S'il y a une défaillance quelconque de cet équipement engendrant une augmentation du champ électrique au-delà de la valeur prévisible il est presque certain que cela est dû à l'inhomogénéité du champ électrique. Dans ces conditions les paramètres principaux qui déterminent le comportement diélectrique et le régime de claquage sont la forme de la tension appliquée, l'état des surfaces et la pression du gaz.

-Décharge couronne en pointe-plan dans le SF₆

Lorsqu'on applique une tension suffisante aux bornes d'un système d'électrodes à géométrie non homogène, on se trouve alors en présence d'un effet couronne qui apparaît sur l'une des électrodes appelée électrode active. Le seuil d'apparition de l'effet couronne dans un système pointe plan dépend de plusieurs paramètres à savoir la pression du gaz, la tension appliquée, la distance inter-électrodes et finalement le rayon de courbure de l'électrode pointe. Les décharges couronnes peuvent apparaître dans tous les gaz électronégatifs et elles ont été considérées comme des décharges erratiques accompagnées d'impulsions dans le circuit extérieur pour la polarité positive et négative.

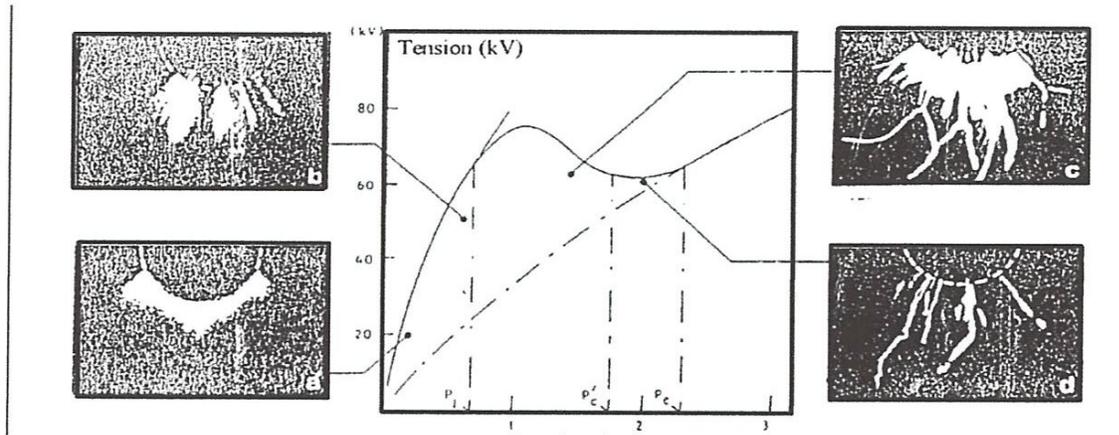


Figure 2: Décharge couronne continue en pointe anodique dans le SF₆

La figure 2, illustre l'aspect lumineux de la décharge couronne lorsque seule la pression varie. Sur cette figure apparaissent, toujours en fonction de la pression, les valeurs des tensions de claquage et des tensions seuils de la décharge couronne. Ces dernières correspondent aux tensions à partir desquelles sont détectées les premières impulsions du courant.

Les caractéristiques typiques du mécanisme de claquage d'un gaz électronégatif en présence d'un champ fortement divergent sont montrées sur la figure 3 .

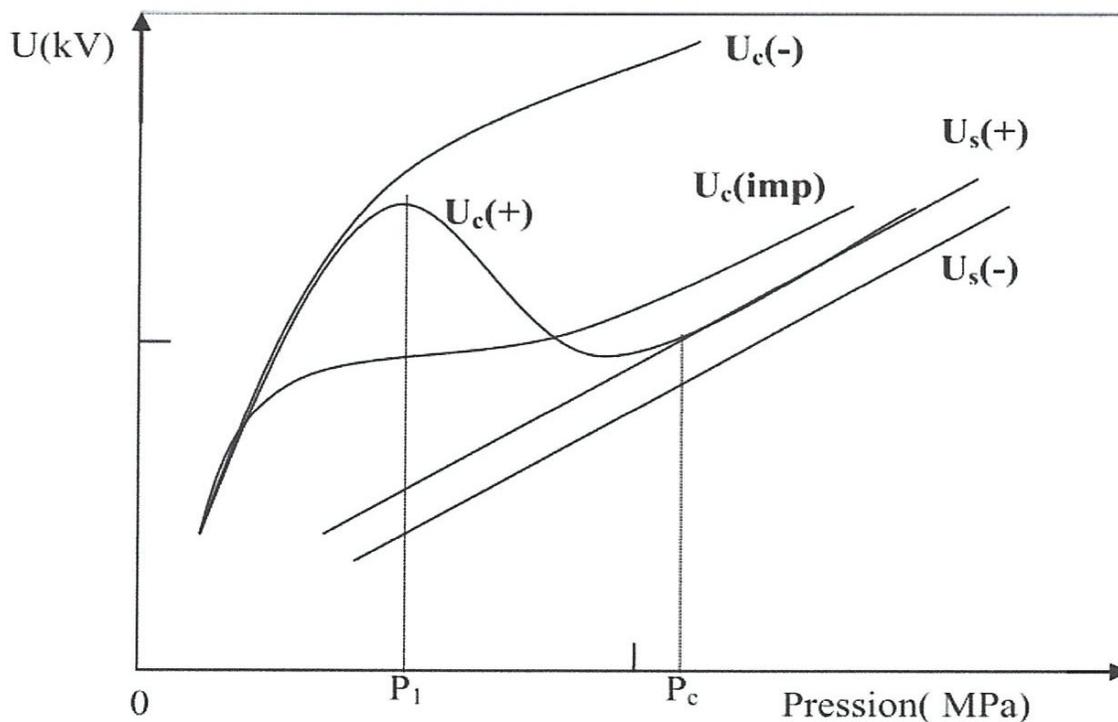


Figure 3: Tensions seuils de claquage et de décharges couronnes dans le SF₆ en fonction de la pression et pour les différentes formes de tensions avec un champ fortement divergent.

Les tensions seuils d'apparition de la décharge couronne représentant un claquage partiel au voisinage de l'électrode pointe est supérieur en polarité positive par rapport à la polarité négative, du fait que les avalanches se développent vers les régions à champ élevé. Par contre, les tensions de claquage sont plus élevées en polarité négative et ils ne présentent pas de maximum. Pour les tensions alternatives le claquage se déroule dans le premier demi-cycle positif et sa caractéristique ressemble à celle de la polarité positive. Pour les claquages dus à des impulsions positives la courbe présente un faible maximum comparé à celle de la polarité positive. Ceci est valable aussi pour l'impulsion négative.

L'écart existant entre la tension seuil (U_s) de la décharge couronne et la tension de claquage, caractérise ce qui est communément appelé l'effet protecteur (corona stabilisation) de la décharge couronne contre le claquage. Ce phénomène tient son nom du fait qu'en configuration pointe-plan, si une haute tension impulsionnelle (c'est-à-dire dont le temps de montée est très court), est appliquée à la pointe, le claquage survient pour des tensions généralement inférieures à celles des tensions continues. Les raisons avancées pour expliquer cette différence, sont qu'en décharge couronne sous tension continue et pour une tension inférieure à la tension disruptive, la charge d'espace constituée par la dérive des ions entre les électrodes, modifie la distribution du champ de telle sorte que la décharge ne peut exister qu'à proximité de la pointe. Signalons que cette notion de protection par effet couronne a bien évidemment suscité l'intérêt des chercheurs. L'effet protecteur peut être décomposé en fonction de la pression du gaz, en trois parties distinctes.

- Pour les pressions les plus basses ($P < P_1$) la protection contre le claquage assurée par la décharge couronne augmente régulièrement jusqu'à atteindre un maximum. Dans cette phase, la tension augmente quasi-linéairement avec la pression et une décharge diffuse prend naissance au bout de la pointe. L'augmentation de la pression provoque la transition progressive vers un régime de décharges filamenteuses (type streamer) confinées à quelques millimètres de la pointe.

- A basse pression et jusqu'à la pression P_1 , le claquage se produit suite à la propagation d'un streamer de la pointe vers le plan. Selon Farish, ceci est possible dès lors que la distribution axiale du champ est telle que le rapport E/P est partout supérieur à la valeur critique de 45 kV/cm/bar pour le SF₆, car d'après l'auteur ce type de claquage ne peut avoir lieu que si les conditions de propagation du streamer sont garanties.

- En augmentant d'avantage la pression ($P > P_1$), la figure nous montre une dégradation manifeste de l'effet protecteur qui se traduit par une réduction abrupte, en fonction de la pression, de l'écart entre les tensions seuils et les tensions de claquage. Cette phase de dégradation de l'effet protecteur atteint son maximum pour une valeur critique de la pression P_c , passé cette limite, la décharge couronne n'existe plus et que le claquage représente la seule manifestation électrique possible.

II.3.2. Détermination de la tension seuil de la décharge couronne dans le SF₆

La forte électronégativité du SF₆ et l'inhomogénéité du champ facilitent la concentration des charges d'espaces (ions) dans la région de champ faible. Cette accumulation des charges d'espaces dans l'intervalle perturbe localement la valeur du champ et influence le processus de claquage. Pour ces conditions le streamer peut se limiter à une décharge de type couronne. L'effet de stabilisation du champ par le nuage d'ions due à cette décharge couronne autour de la pointe exige des tensions de claquage nettement supérieures à celles obtenues par le critère des streamers. Pour des configurations induisant des champs fortement inhomogènes cette valeur calculée correspond plutôt à la valeur d'amorçage de la couronne U_s et non pas la valeur de claquage. Un modèle théorique a été proposé par Nitta et Shibuya pour le calcul de la tension de la décharge couronne en présence dans champ fortement divergent et qui est basé sur le critère des Streamers $\int_0^{X_c} (\alpha - \eta) dx = K$

$$V_{seuil} = \left(\frac{E}{p}\right)_{lim} \cdot U \cdot P \cdot d \left[1 + \frac{C}{\sqrt{P \cdot r_p}}\right] \quad (II.3)$$

$(E/p)_{lim}$ est le champ critique en kV/cm.bar, P est la pression (en bar) et u est le facteur d'utilisation du champ: $U = \frac{E_{moyen}}{E_{maximum}}$

Pour le cas d'une configuration pointe-plan la valeur de u est donnée par l'expression [II .4]:

$$U = r_p \cdot \frac{\ln(1+2d/r_p)}{2d} \quad (II .4)$$

r_p est le rayon de la pointe.

La constante C est donnée par l'équation suivante:

$$C = \sqrt{\frac{4k}{\beta + \left(\frac{E}{p}\right)_{\text{lim}}}} \quad (\text{II}.5)$$

Avec K correspondant au critère des streamers et la constante β vient d'une approximation du coefficient d'ionisation effectif α du SF₆ :

$$\alpha = \beta \cdot [(E/p) - (E/p)_{\text{lim}}] \quad (\text{II}.6)$$

II.3.3. Facteurs influençant la tenue diélectrique du SF₆

Le comportement du SF₆ est tributaire des phénomènes tendant à modifier le champ car le coefficient d'ionisation effectif augmente très rapidement en fonction du champ. Parmi les facteurs influents sur la tenue diélectrique, nous examinons l'effet des particules métalliques et la nature des matériaux des électrodes.

-Les particules métalliques :

La présence des particules peut réduire de manière notable la tension d'amorçage de l'intervalle. Cette réduction est fonction de leur dimension, de leur matériau, de leur position dans l'intervalle, ainsi que de la nature du gaz et de celle de la tension appliquée. Les phénomènes de charge d'espace en continue et les alternances en alternative provoquent le va et vient des particules entre les électrodes. Toutefois, la probabilité qu'elles atteignent à chaque fois une des électrodes est beaucoup plus réduite en alternative qu'en continue, du fait de la durée relativement courte des alternances.

En onde de choc, les particules ont encore moins de temps pour atteindre les électrodes.

Sommairement, l'influence des particules conductrices sur la tenue diélectrique des systèmes isolés par le SF₆ s'explique par le fait, qu'en raison justement de leur caractère conducteur, les lignes de champ électrique convergent à leur proximité. L'augmentation conséquente de l'intensité du champ favorise le développement de décharge à leur niveau.

Un des moyens classiques pour s'affranchir des effets des particules est de les entraîner dans une région à champ faible voir nul et de les piéger. Ainsi, dans la plupart des équipements au SF₆, on trouve des pièges à particules permettant de maintenir les particules dans des poches ou elles ont été isolées par le champ.

-Le matériau des électrodes :

Le matériau des électrodes, particulièrement celui de la cathode, influe sur la décharge à travers l'émission électronique par les ions positifs et par les photons, surtout dans les configurations où la pression et le champ sont élevés. La rugosité de la surface des électrodes, en particulier les protubérances (aspérités), génère des champs locaux nettement supérieurs au champ appliqué. La diminution de la tension d'amorçage dépend de la hauteur de l'aspérité (h) et de la pression (P).

II.4. Les réseaux de neurones

II.4.1 Introduction

Lorsqu'apparaît une nouvelle technique, l'ingénieur se demande naturellement en quoi cette nouveauté peut lui être utile. Si elle est dotée d'un nom plus métaphorique que technique, (ce qui est évidemment le cas pour les réseaux de neurones), la réponse à cette question doit être particulièrement précise et moitié. De plus, la mise en œuvre des réseaux de neurones est très simple ; la tentation peut être grande, d'appliquer cette technique de manière irréfléchie ou inadaptée, ce qui ne peut conduire qu'à des déceptions. C'est pourquoi nous expliquerons ici les principes fondamentaux qui justifient l'intérêt pratique des réseaux de neurones, et nous situerons ces derniers dans la perspective des méthodes classiques de traitement statistique de données ; nous montrerons que la technique des réseaux de neurones formels doit être considérée comme une extension puissante de techniques bien connues des ingénieurs.

II.4.2. Historique

II.4.2.1. Les débuts.

- 1890 : W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative, et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb. [II.5].

- 1943 : J. Mc Culloch et W. Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ceux sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique). [II.6].

II.4.2.2. Les premiers succès

- 1957 : F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuro-ordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes. Notons qu'à cet époque les moyens à sa disposition sont limités et c'est une prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine plus de quelques minutes. [II.7].

- 1960 : B. Widrow, un automaticien, développe le modèle Adaline (Adaptative Linear Element). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. [II.8]. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de rétropropagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons multicouches. Les réseaux de type Adaline restent utilisés de nos jours pour certaines applications particulières.

- 1969 : M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron. Limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à tous modèles de réseaux de neurones artificiels. Leur objectif est atteint, il y a abandon financier des recherches dans le domaine (surtout aux U.S.A.), les chercheurs se tournent principalement vers l'Intelligence Artificielle et les systèmes à bases de règles. [II.9].

II.4.2.3. L'ombre

- 1967 à 1982 : Toutes les recherches ne sont, bien sûr, pas interrompues. Elles se poursuivent, mais déguisées, sous le couvert de divers domaines comme : le traitement adaptatif du signal, la reconnaissance de formes, la modélisation en neurobiologie, etc. De grands noms travaillent durant cette période telle [II.10] et [II.11].

II.4.2.4. Le renouveau

- 1982 : J. J. Hopfield est un physicien reconnu à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels. A cela plusieurs raisons : Au travers d'un article court, clair et bien écrit, il présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones (Hopfield, 1982). Il faut remarquer la présentation anticonformiste de son article. Alors que les auteurs s'acharnent jusqu'alors à proposer une structure et une loi d'apprentissage, puis à étudier les propriétés émergentes ; J. J. Hopfield fixe préalablement le comportement à atteindre pour son modèle et construit à partir de là, la structure et la loi d'apprentissage correspondant au résultat escompté. Ce modèle est aujourd'hui encore très utilisé pour des

problèmes d'optimisation. D'autre part, entre les mains de ce physicien distingué, la théorie des réseaux de neurones devient respectable. Elle n'est plus l'apanage d'un certain nombre de psychologues et neuro-biologistes hors du coup.

Notons qu'à cette date, l'intelligence artificielle est l'objet d'une certaine désillusion, elle n'a pas répondu à toutes les attentes et s'est même heurtée à de sérieuses limitations. Aussi, bien que les limitations du Perceptron mise en avant par M. Minsky ne soient pas levées par le modèle d'Hopfield, les recherches sont relancées. [II.12].

II.4.2.5. La levée des limitations

- 1985 : La Machine de Boltzmann est le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du perceptron. Mais l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue (les temps de calcul sont considérables). [II.13].

- 1986 : L'algorithme d'apprentissage de rétro-propagation de gradient apparaît. [II.14] C'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches (aussi appelés Perceptrons multicouches). Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. De nos jours, les réseaux multicouches et la rétro-propagation de gradient reste le modèle le plus étudié et le plus productif au niveau des applications.

-1989 : Vingt ans après la publication de l'ouvrage où Minsky et Papert exposaient les limitations du perceptron, nétablissent les réseaux de neurones comme une classe d'approximateurs universels. [II.15 - II.16- II.17]. Il a été ainsi 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. Néanmoins, cette propriété ne permet pas de choisir, pour un type de fonction donné, le nombre de neurones optimal dans la couche cachée. En d'autres termes, ce résultat ne mène pas vers une technique de construction d'architecture.

-1994 : Hornik [II.18].a démontré la parcimonie des réseaux de neurones à une couche cachée, ce qui a permet d'étendre les champs d'application des réseaux de neurones aux applications en temps réel.

II.4.2.6. La situation actuelle

Les réseaux de neurones occupent de nos jours une place importante dans le domaine de la modélisation, de la commande et de la classification, ce qui justifie l'intérêt que le monde scientifique et industriel continue à porter au « connexionnisme ».

II.4.3 Les neurones formels

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie".

Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel. On a pris l'habitude de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la Figure 4.

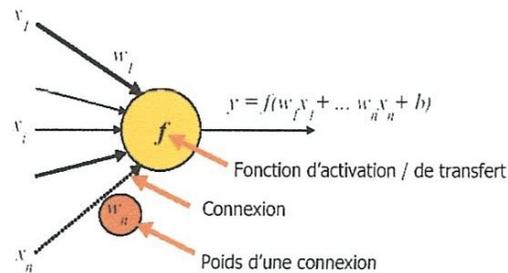


Figure 4: neurone formel

Où les x_i sont les variables (ou entrées) du neurone, les w_i sont des paramètres ajustables, y est la sortie du neurone et b est le biais.

Les neurones les plus fréquemment utilisés sont ceux pour lesquels la fonction d'activation f est une fonction non linéaire (généralement une tangente hyperbolique ou une sigmoïde) d'une combinaison linéaire des entrées.

II.4.3.1. Différents types de neurones :

La fonction d'activation (de transfert) utilisée dans le modèle de McCulloch & Pitts est la fonction échelon (Figure 5-a). Elle fait passer l'activation du neurone d'une valeur à une autre dès que l'entrée résultante dépasse un certain seuil. L'inconvénient de cette fonction est

qu'elle n'est pas différentiable, ce qui pose un problème pour les algorithmes basés sur le gradient.

Pour remédier à cet inconvénient, on cherche à approximer cette fonction d'activation par une fonction « non linéaire » différentiable.

Deux fonctions de ce type sont particulièrement intéressantes et sont souvent utilisées : la fonction tangente hyperbolique définie par :

$$f(u) = \tanh(\beta u) = \frac{e^{\beta u} - e^{-\beta u}}{e^{\beta u} + e^{-\beta u}} \quad (\text{II.7})$$

et la fonction logistique (Figure 5.c) dont l'expression est la suivante :

$$f_{\beta}(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta u}} \quad (\text{II.8})$$

La fonction « tanh » est bornée entre -1 et +1 alors que la fonction logistique est bornée entre 0 et 1. Ces deux fonctions, appelées fonctions sigmoïdes, sont liées par la relation :

$$\tanh(\beta u) = 2f_{\beta}(u) - 1 \quad (\text{II.9})$$

Où le paramètre β est appelé le gain. Plus le gain est important, plus la saturation du neurone est rapide (dans notre travail, le paramètre β est pris égal à 1).

La fonction logistique (5) est appelée aussi sigmoïde unipolaire. Elle admet une variante appelée sigmoïde bipolaire (Figure 5.d) ayant pour expression :

$$f_{\beta}(u) = \frac{1 - e^{-\beta u}}{1 + e^{-\beta u}} \quad (\text{II.10})$$

Les fonctions sigmoïdes ont la propriété d'être différentiables, ce qui est nécessaire pour les algorithmes basés sur le gradient. Une autre propriété intéressante est le fait que les fonctions décriées peuvent s'exprimer facilement à l'aide des fonctions elles-mêmes, ce qui permet un gain significatif de temps de calcul.

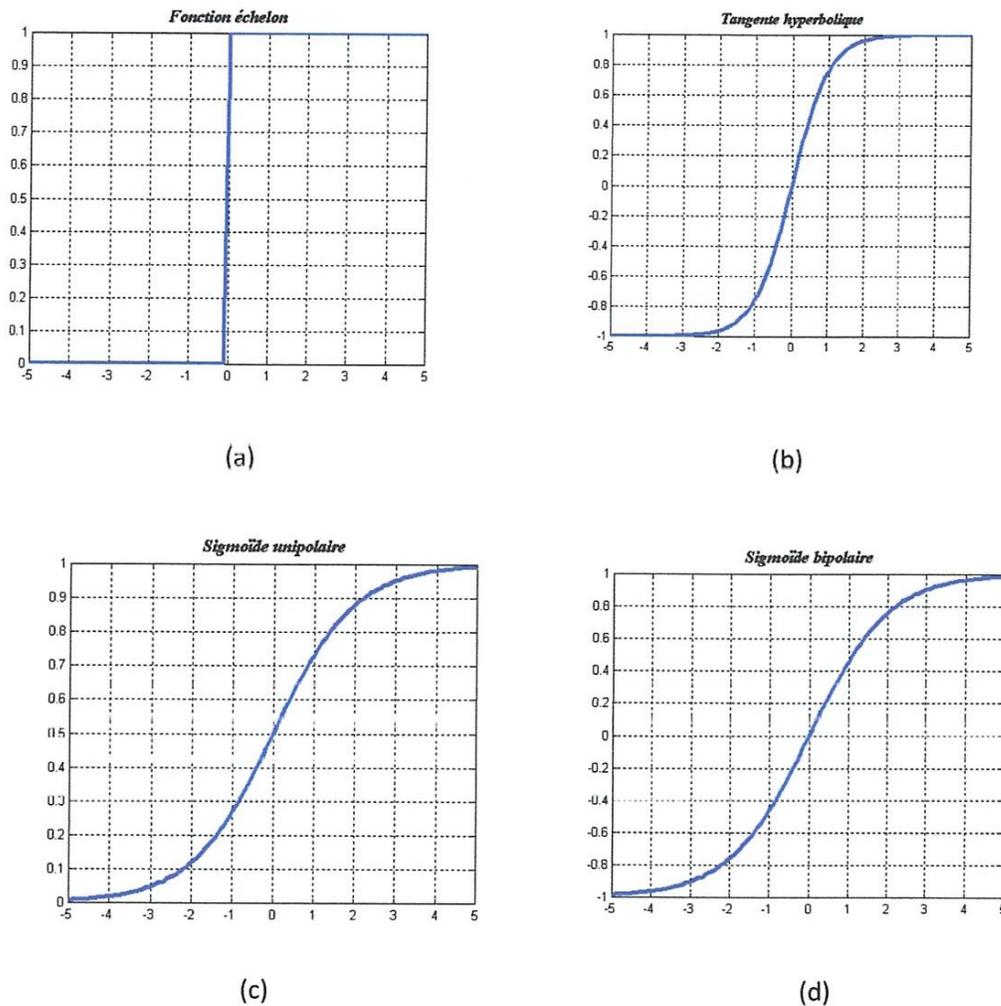


Figure 5: Différentes fonctions d'activation

Un neurone formel ne réalise donc rien d'autre qu'une somme pondérée suivie d'un non linéarité. C'est l'association de tels éléments simples sous la forme de réseaux qui permet de réaliser des fonctions utiles pour des applications industrielles.

II.4.4. Les réseaux de neurones formels :

On distingue deux grands types d'architectures de réseaux de neurones : les réseaux de neurones non bouclés (statiques) et les réseaux de neurones bouclés (dynamiques ou récurrents).

II.4.4.1. Les réseaux de neurones non bouclés (statiques) :

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones.

Un réseau de neurones non bouclé est représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties sans retour en arrière ; si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les connexions entre ceux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique. Le terme de connexions est une métaphore : dans la très grande majorité des applications, les réseaux de neurones sont des formules algébriques dont les valeurs numériques sont calculées par des programmes d'ordinateurs, non des objets physiques (circuits électroniques spécialisés) ; néanmoins, le terme de connexion, issu des origines biologiques des réseaux de neurones, est passé dans l'usage, car il est commode quoique trompeur. Il a même donné naissance au terme de « connexionisme ».

II.5. Perceptron multicouches (PMC) :

La Figure 6 représente un réseau de neurones non bouclé qui a une structure particulière, très fréquemment utilisée : c'est le PMC. Ses neurones sont organisés en couches successives. Chaque neurone d'une couche reçoit des signaux de la couche précédente et transmet le résultat à la suivante, si elle existe.

Les neurones d'une même couche ne sont pas interconnectés. Un neurone ne peut donc envoyer son résultat qu'à un neurone situé dans une couche postérieure à la sienne. L'orientation du réseau est fixée par le sens, unique, de propagation de l'information, de la couche d'entrée vers la couche de sortie.

Pour les réseaux considérés, les notions de couches d'entrée et de sortie sont donc systématiques. Ces dernières constituent l'interface du réseau avec l'extérieur. La couche d'entrée reçoit les signaux (ou variables) d'entrée et la couche de sortie fournit les résultats. Enfin, les neurones des autres couches (couches cachées) n'ont aucun lien avec l'extérieur et sont appelés neurones cachés.

Par convention, les neurones d'entrée ont toujours une fonction d'activation « identité », laissant passer l'information sans la modifier.

En ce qui concerne les neurones de sortie, on peut leur associer une fonction d'activation linéaire ou non, dérivable ou non, suivant la nature du problème à résoudre.

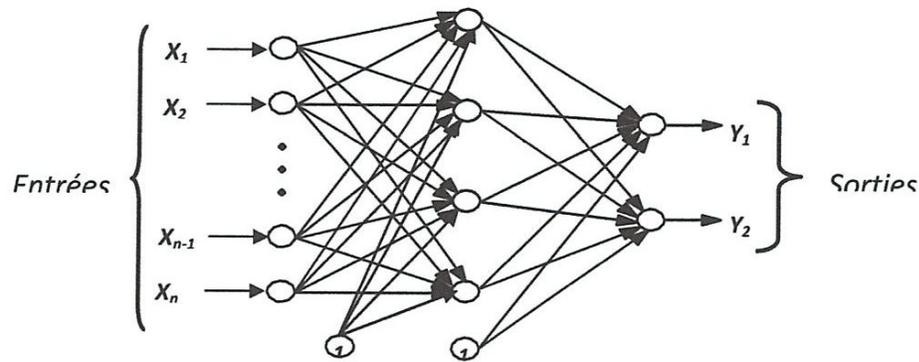


Figure 6: Perceptron multicouche à une couche cachée

Les réseaux de neurones non bouclés sont des objets statiques : si les entrées sont indépendantes du temps, les sorties le sont également. Ils sont utilisés principalement pour effectuer des tâches d'approximation de fonction non linéaire, de classification ou de modélisation de processus statiques non linéaires.

II.6. Propriétés des Réseaux de Neurones Formels :

Les propriétés essentielles des réseaux de neurones sont :

II.6. 1. Le parallélisme:

Cette notion se situe à la base de l'architecture des réseaux de neurones considérés comme ensemble d'entités élémentaires qui travaillent simultanément.

Le parallélisme permet une rapidité de calcul supérieure mais exige de penser et de poser différemment les problèmes à résoudre.

II.6. 2. La capacité d'adaptation:

Elle se manifeste par la capacité d'apprentissage qui permet de tenir compte des nouvelles contraintes ou de nouvelles données du monde extérieur. Certains réseaux se caractérisent aussi par leur capacité d'auto-organisation qui assure leur stabilité en tant que systèmes dynamiques capables de tenir compte de situations non encore connues.

II.6.3. La facilité de construction

La simulation informatique de réseaux de neurones pour une petite application est simple et ne nécessite qu'un temps de développement assez court. Pour des applications plus complexes, l'utilisation de simulateur ou de carte accélératrice se révèle utile.

II.7. Apprentissage d'un réseau de neurones

Un réseau de neurones définit une famille de fonctions. L'apprentissage consiste à déterminer la solution du problème posé au sein de cette famille de fonctions. Ces fonctions pourront avoir des capacités limitées comme les fonctions linéaires ou au contraire permettre la construction de fonctions aussi complexes qu'on le désire comme les PMCs. Le principe d'apprentissage est l'optimisation d'une fonction de coût calculée à partir des exemples de la base d'apprentissage et de la sortie du réseau de neurones.

Les méthodes numériques utilisées sont le plus souvent des méthodes approchées basées sur des techniques de gradient.

II.7. 1.Type d'apprentissage :

Il existe de nombreux types de règles d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories: les règles d'apprentissage supervisé, non supervisé, et renforcé. Mais l'objectif fondamental de l'apprentissage reste le même : soit la classification, l'approximation de fonction ou encore la prévision. Dans l'optique de la prévision, l'apprentissage consiste à extraire des régularités (à partir des exemples) qui peuvent être transférées à de nouveaux exemples.

II.7.1.1.Apprentissage supervisé :

Un apprentissage est dit supervisé lorsque l'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif. Ce genre d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une base d'apprentissage, constituée de plusieurs exemples de type entrées-sorties (les entrées du réseau et les sorties désirées ou encore les solutions souhaitées pour l'ensemble des sorties du réseau).

La procédure usuelle dans le cadre de la prévision est l'apprentissage supervisé (ou à partir d'exemples) qui consiste à associer une réponse spécifique désirée à chaque signal d'entrée. La modification des poids s'effectue progressivement jusqu'à ce que l'erreur (ou l'écart) entre les sorties du réseau (ou résultats calculés) et les résultats désirés soient minimisés.

Cet apprentissage n'est possible que si un large jeu de données est disponible et si les solutions sont connues pour les exemples de la base d'apprentissage.

II.8. Validation et Tests

Alors que les tests concernent la vérification des performances d'un réseau de neurones hors échantillon et sa capacité de généralisation, la validation est parfois utilisée lors de l'apprentissage. Une fois le réseau de neurones développé, des tests s'imposent afin de vérifier la qualité des prévisions du modèle neuronal.

Cette dernière étape doit permettre d'estimer la qualité du réseau obtenu en lui Présentant des exemples qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage. Une validation

Rigoureuse du modèle développé se traduit par une proportion importante de prédictions exactes sur l'ensemble de la validation. Si les performances du réseau ne sont pas satisfaisantes, il faudra, soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base d'apprentissage.

II.9.Choix de l'architecture :

Tableau.3. Paramètres choisis

Paramètres	choix
Modèle utilisé	Perceptron multicouches (MLP)
Entrée	Pression (densité du gaz)
Algorithme d'apprentissage	Levenberg-Marquardt
Nombre de couches	3
Fonction d'activation au niveau de la couche cachée	Sigmoïde (logsig)
Durée d'apprentissage	5000 epochs
Critère de performance	10^{-10}

Le modèle neuronal proposé est un perceptron monocouche, type feedforward utilisé pour la prédiction, avec un apprentissage supervisé (Tableau) et un algorithme d'apprentissage selon la méthode de Levenberg-Marquardt.

Cet algorithme se déroule comme suit :

- 1- Initialiser aléatoirement les poids du réseau
- 2- Présenter le premier exemple et calculer la sortie
- 3- Comparer la sortie avec la sortie réelle et calculer l'erreur
- 4- Rétropropager l'erreur et adapter les poids :
- 5- Si l'erreur nouvelle $>$ l'erreur ancienne $\Rightarrow W_{\text{nouveau}} = W_{\text{ancien}} + \Delta W$,
règle d'apprentissage
- 6- Si l'erreur nouvelle $<$ l'erreur ancienne \Rightarrow Pas de modification de poids
- 7- Test si la performance désirée est atteinte \Rightarrow Arrêt
- 8- Sinon arrêt avec le nombre d'itérations (Cycles, epochs.)

Où : W : vecteur des poids synaptiques

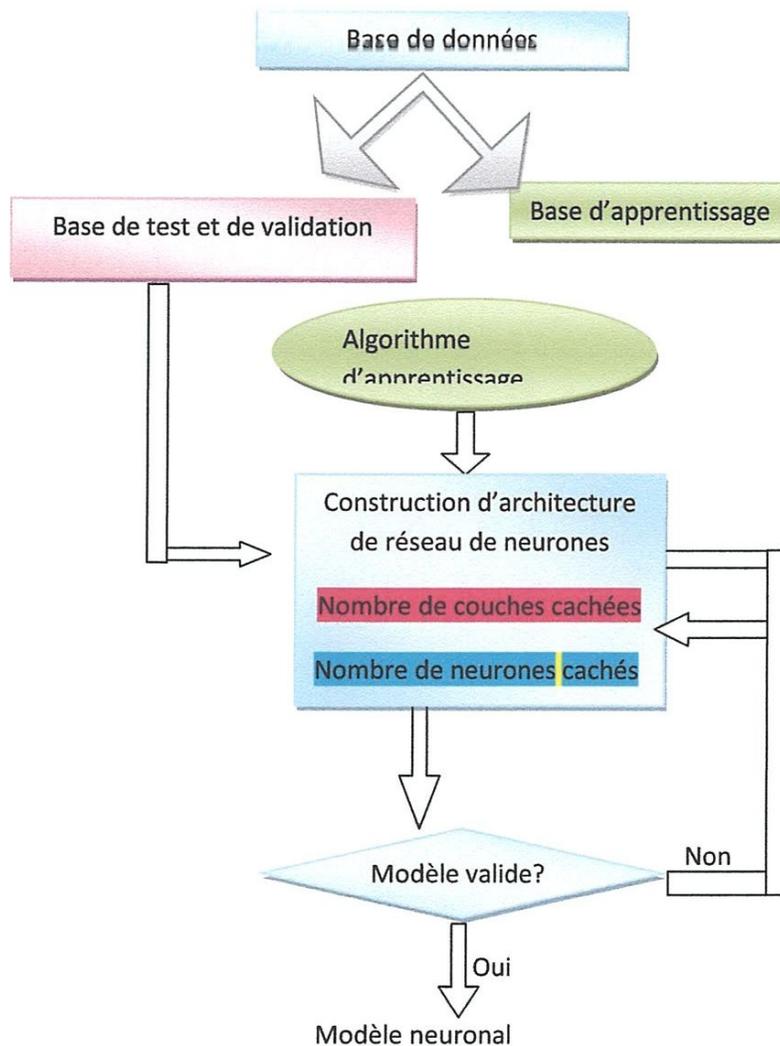


Figure 7: Organigramme de conception d'un réseau de neurones.

Chapitre 3

Partie pratique

III. Prédiction des tensions seuils par les réseaux de neurones

III.1. TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Les résultats expérimentaux utilisés dans ce travail sont faites au niveau du laboratoire LGEG de Grenoble. Le schéma du dispositif expérimentale est présenté sur la figure 1 [III.1]. La cellule d'étude en acier inoxydable, contient deux électrodes, l'une plane, en acier inoxydable ayant un rayon de 12 mm connectée à un électromètre afin de mesurer le courant collecté, et l'autre dite de pointe fabriquée en tungstène par la technique d'électrolyse et possédant un rayon de courbure de l'ordre de quelques micromètres. La pointe est connectée à la source de haute tension à courant continu (dont la tension peut atteindre jusqu'à 60 kV). La cellule est nettoyée et placée sous vide à l'aide d'une pompe primaire à une pression de l'ordre de $5 \cdot 10^{-1}$ Pa, avant l'introduction du gaz. Le SF₆ délivré est d'une pureté de 99.97%. Les mesures sont réalisées pour des pressions élevées variant de 2 à 15 bars et des distances inter-électrodes variant de 4 à 10 mm.

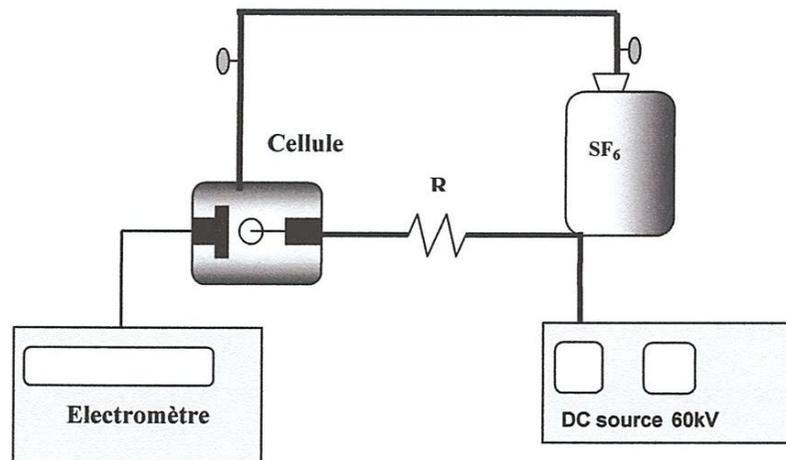


Figure.1. Dispositif de mesure pour la détermination des tensions seuils

III.2. Résultats et discussion :

III.2.1. Caractéristiques courant-tension pour le SF₆ pur.

Les tensions seuils des décharges couronnes sont mesurées par l'utilisation des caractéristiques I (U) pour les deux polarités et pour différentes valeurs de pressions (P) dans le SF₆ pur.

Sur les (figures 2 et 3) sont représentées les caractéristiques des tensions seuils pour le SF₆ pur à différentes valeurs de pression (P) en polarité négative et en polarité positive.

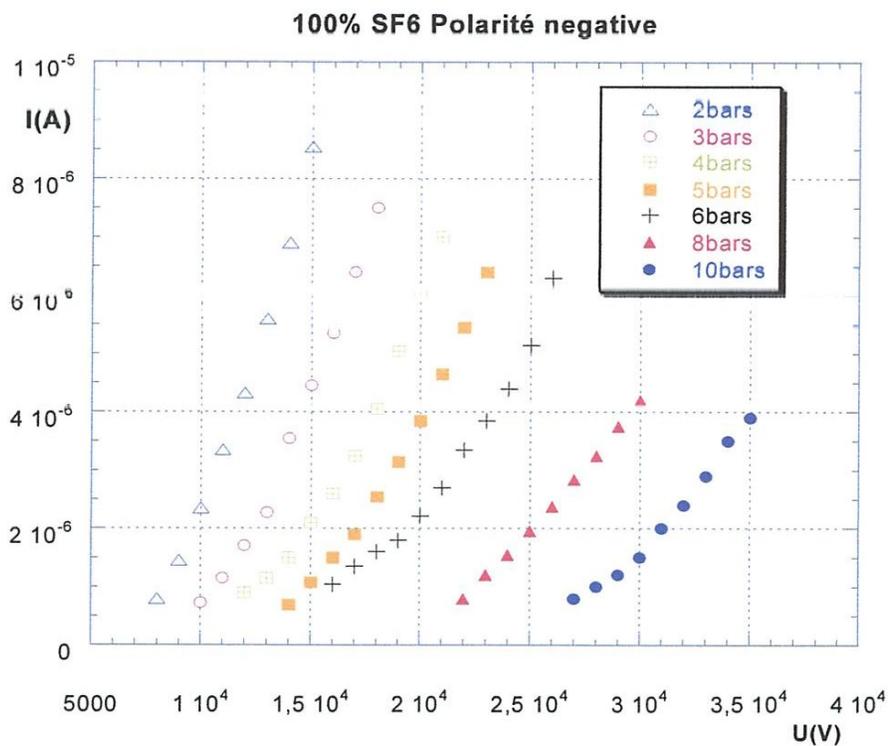


Figure.2. Les caractéristiques des tensions seuils pour le SF₆ pur à différentes valeurs de pression (P) en polarité négative.

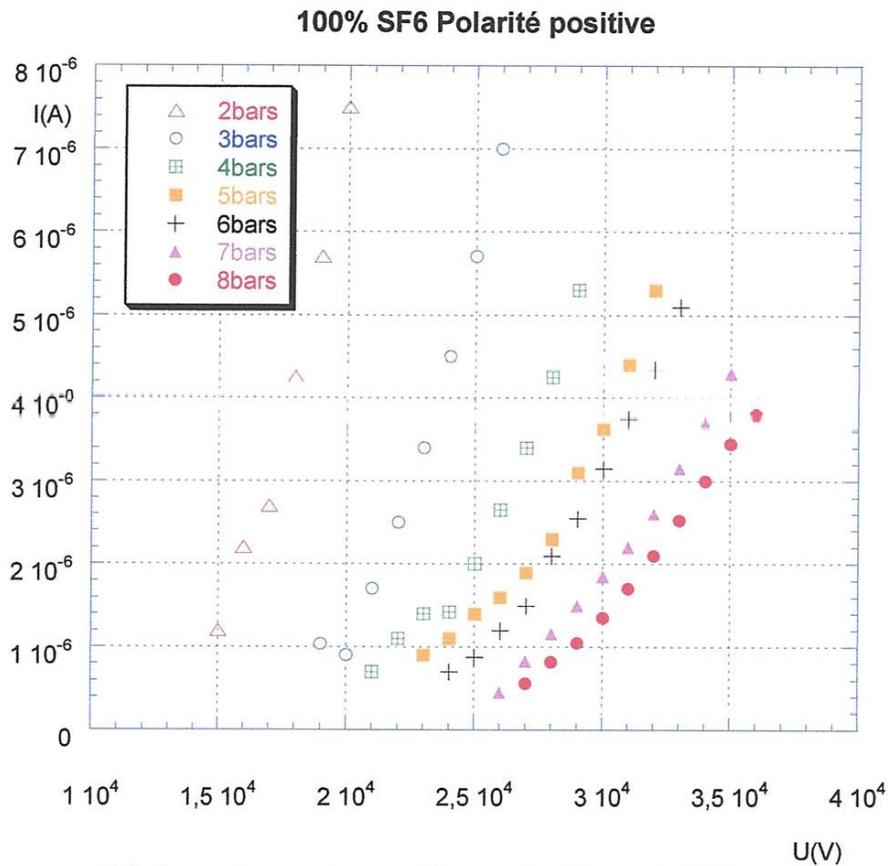


Figure.3. Les caractéristiques des tensions seuils pour le SF₆ pur à différents valeurs de pression (P) en polarité positive.

Comme on peut le voir le courant augmente et suit une croissance exponentielle en fonction de l'augmentation de la tension appliquée. Les courbes perdent leurs linéarités avec l'augmentation de la pression. Il a été remarqué que le courant mesuré en décharge positive est très instable. Les valeurs des tensions de la décharge couronne obtenue pour la polarité positive sont supérieures à celles de la polarité négative.

III.2.2. Simulation des courbes U(I)

En utilisant la base des données représentées sur la figure (2), les courbes U (I) ont pu être simulées comme on peut les voir sur les figures suivantes.

Sur la figure 4, Après la convergence du réseau de neurones proposé vers l'erreur quadratique moyenne désirée, ce qui démontre la réussite de la phase d'apprentissage du modèle RNA. Nous avons utilisé une nouvelle séquence de données, ayant les mêmes caractéristiques que la séquence d'apprentissage, pour effectuer un test de validation.

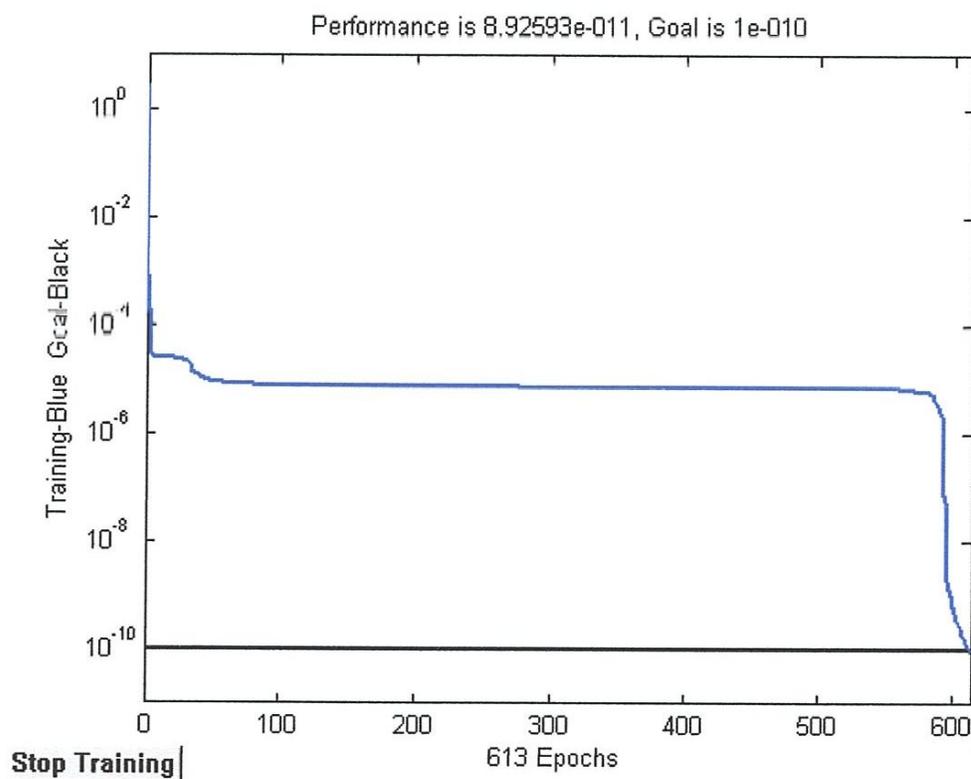


Figure.4. Evolution de l'erreur pour le SF₆ pure à 2 Bars, en polarité négative.

L'évolution de l'erreur moyenne de prédiction à 2 bars est très réduite et varie dans les limites admissibles (figure 5).

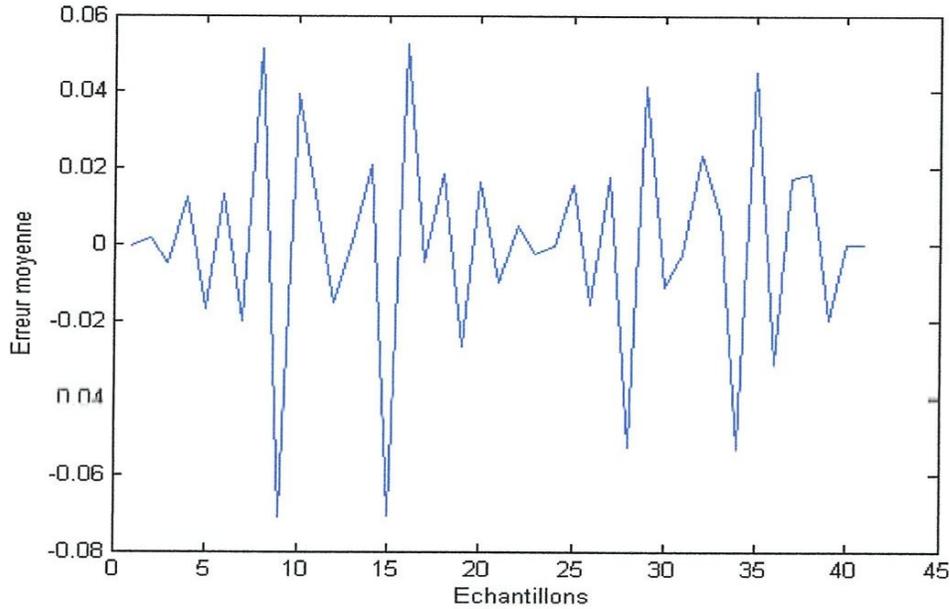


Figure.5. Evolution de l'erreur moyenne de prédiction à 2 bars.

Sur la figure 6, les courbes $U(I)$ prédites sont comparées à celles mesurées pour le SF₆ pur à 2 bars. On constate qu'il y a une concordance totale entre les deux courbes.

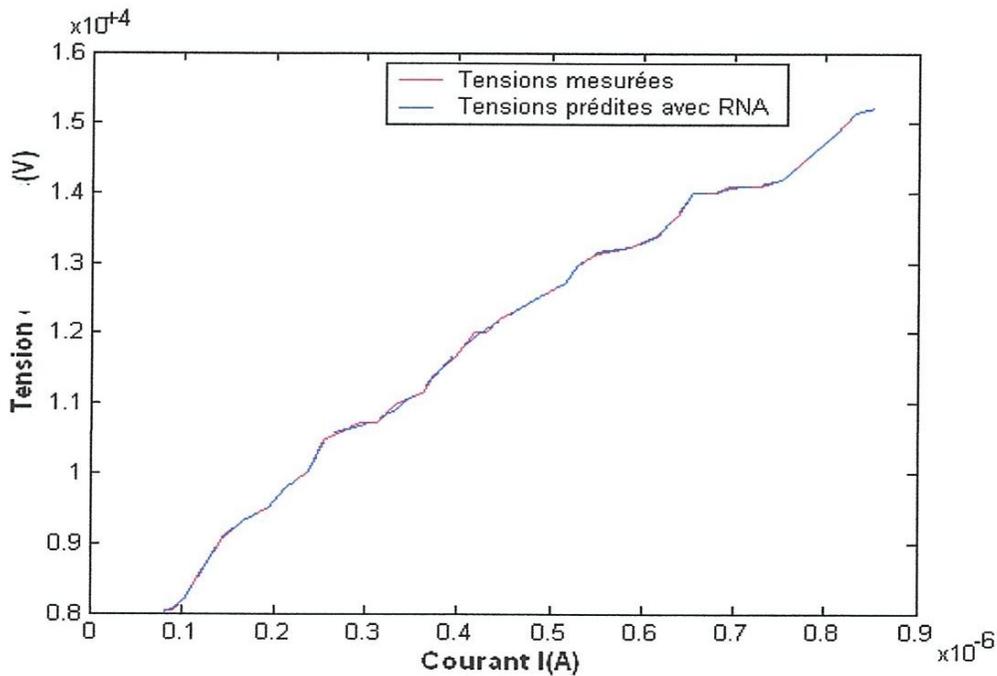


Figure.6. Courbes $U(I)$ mesurées et prédites pour SF₆ pur à 2 Bars en polarité négative.

Sur les figures 7 et 8 sont représentées les courbes de l'évolution de l'erreur et les courbes des tensions seuils pour le SF₆ à 5 bars. On peut observer que les tensions de seuils prédites pour le SF₆ pur en utilisant la prédiction par l'RNA semblent être en bonne accord avec ceux obtenus expérimentalement, aussi l'évolution de l'erreur est insignifiante

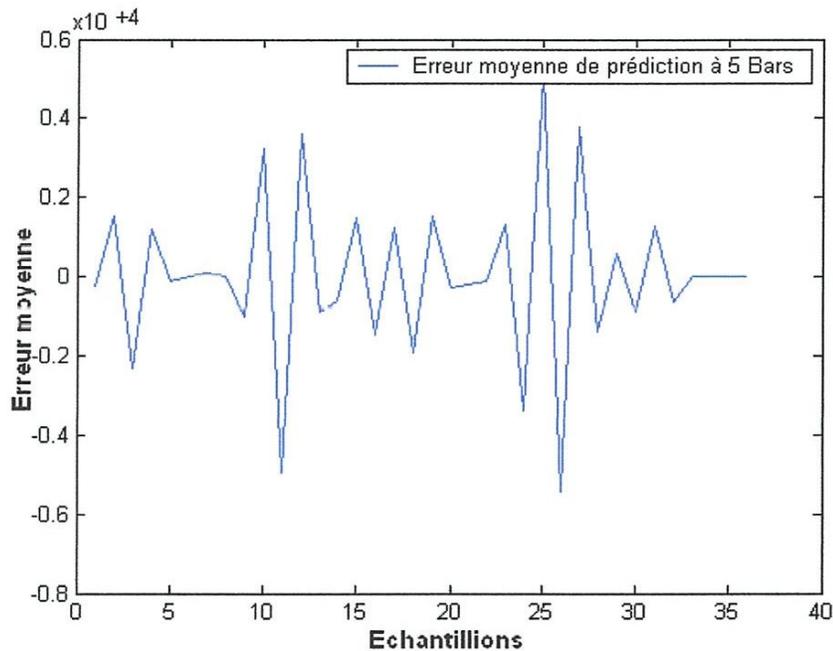


Figure.7. Evolution du l'erreur moyenne de prédiction à 5bars

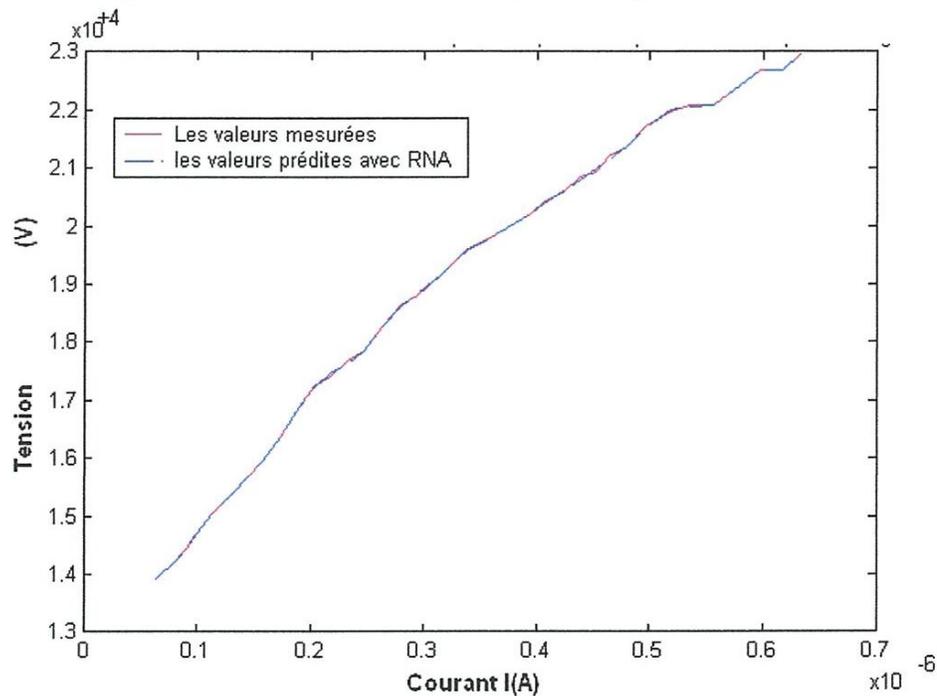
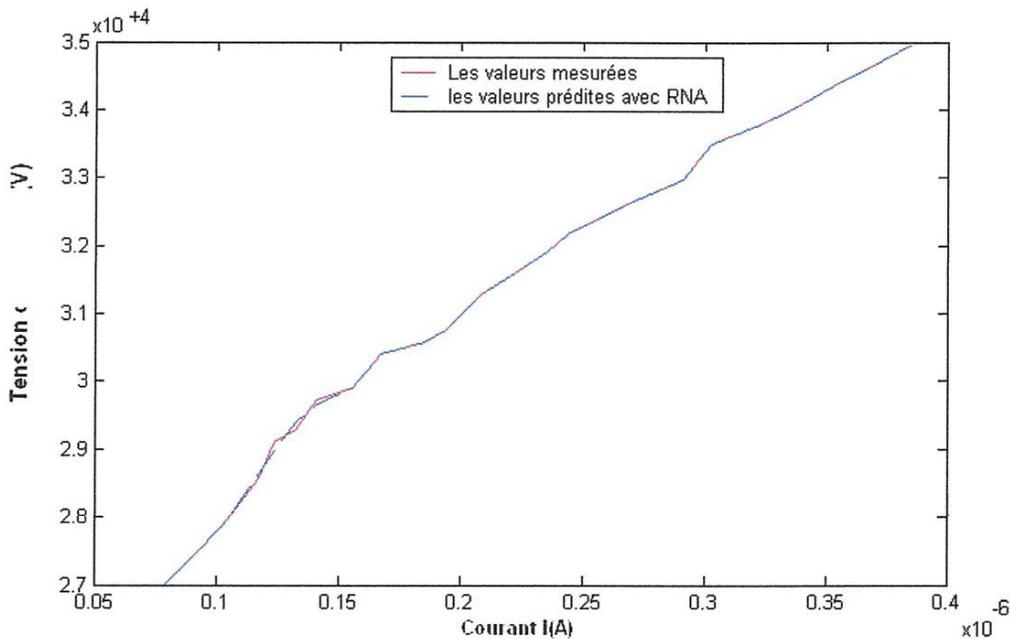
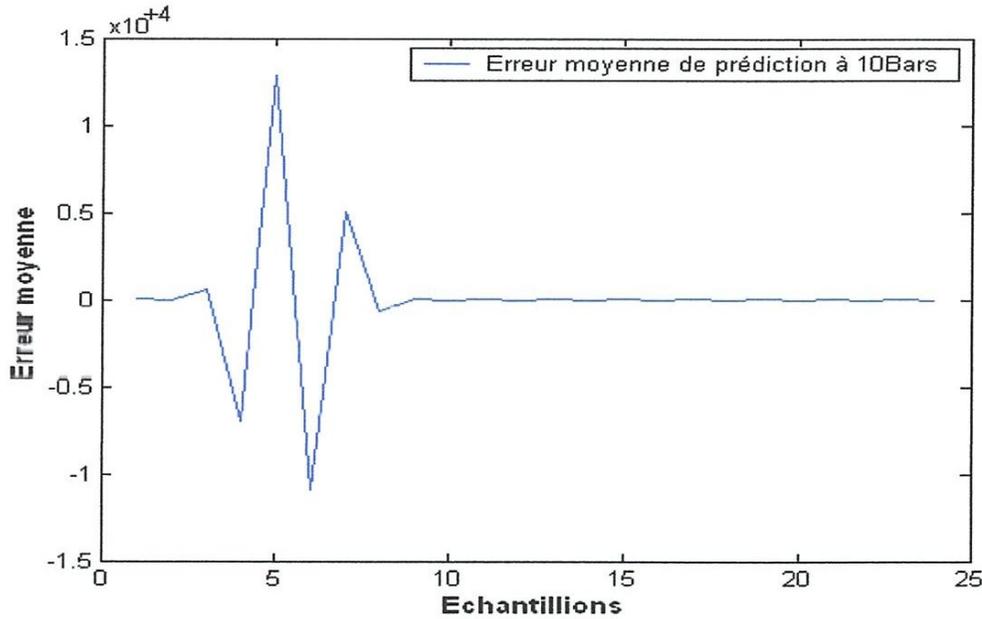


Figure.8. Courbes U(I) mesurées et prédites pour SF₆ pur à 5Bars en polarité négative.

L'évolution du taux de l'erreur de prédiction est présentée sur la figure 9 pour une pression de 10 bars et sa valeur est inférieure à 10%. Comme pour les autres pressions les résultats expérimentaux et de simulation sont très proches (figure 10).



Les tensions seuils calculées par le modèle empirique de Malik et Quershi et celui de Kline comparées aux résultats obtenus par la prédiction des réseaux neurones pour le SF₆ pur en polarité négative et montré sur la figure 11. On constate que les valeurs des tensions seuils prédites sont légèrement supérieures aux valeurs déterminées par les modèles empiriques.

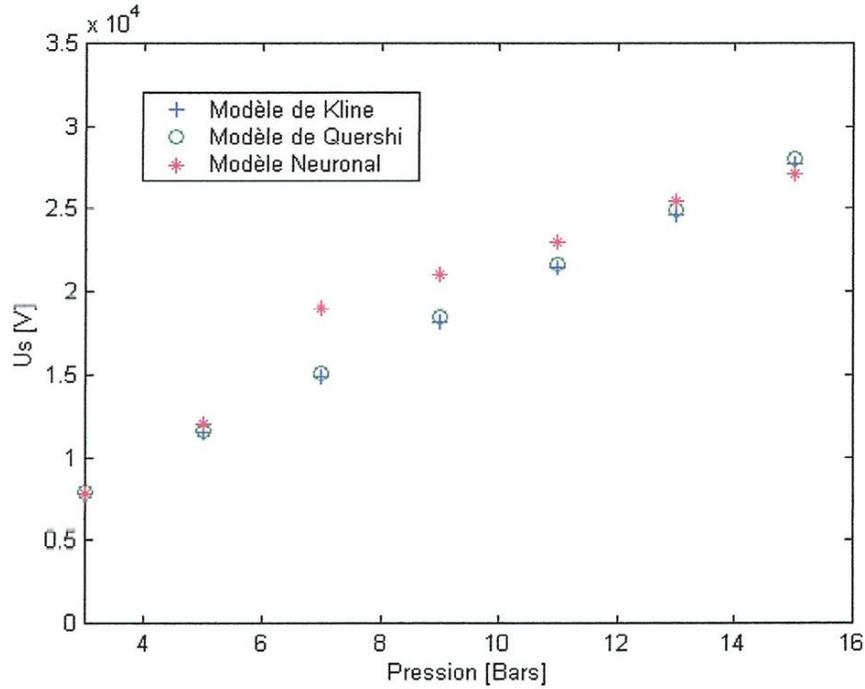


Figure .11. Les tensions seuils calculées par le modèle empirique de Malik et Quershi et celui de Kline comparées aux résultats obtenus par la prédiction des réseaux neurones pour le SF₆ pur.

Conclusion générale :

Un aperçu général sur les catégories des diélectriques et les divers paramètres influant directement ou indirectement sur l'état d'isolement d'un diélectrique ont été réalisés.

Les différents paramètres du SF₆ comme gaz isolant ont été évoqués ainsi que le phénomène des décharges et la technique de simulation basée sur les réseaux neurones artificiels.

Les résultats obtenus des Tensions seuils en polarité négative en utilisant les modèles empiriques sont en concordance avec ceux déterminés par le modèle neuronal pour le SF₆.

Parmi les conditions à satisfaire pour réaliser un apprentissage raisonnable du modèle neuronal de prédiction, on peut citer :

- ✓ la sortie du modèle doit être proche de celle du processus réel.
- ✓ l'erreur de prédiction finale doit être la plus faible possible

Avec les résultats ainsi obtenus, nous espérons aboutir au bout de ce travail :

- Construction d'un réseau de neurone à une couche cachée type feed-forward ayant les capacités de prédire les tensions seuils en polarité négative à différentes pressions pour le SF₆ pur
- Apprendre à programmer avec le MATLAB : Dans MATLAB, l'élaboration d'un modèle neuronal semble être aisée du moment où l'application est claire (choix de l'échantillon d'apprentissage, type du RNA, nombre de neurones dans la couche cachée).
- Bien que le modèle empirique soit en accord avec les valeurs mesurées et ce pour les faibles pressions, il est remarqué leur insuffisance pour les pressions élevées, ce qui justifie l'emploi des modèles de prédictions neuronales.

Références bibliographiques

Chapitre I

[I - 01]- R Fournié, " Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique "

[I -0 2]- "Mémoire Etude des décharges électriques dans les gaz isolant"

[I -0 3] - http://cdoc.bib.ucl.ac.be:61/ETD-db/collection/available/FUNDPetd-02232005-200950/unresricied/05_chap1.pdf

[I -04]-C. Menguy, " Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique "

[I -05] -A. Boubakeur, " Claquage des diélectriques liquides ", support de cours l'université de Batna, 2002/2003.

Chapitre II

[II -1]-H. Moisson et P. Lebeau, Comp. Rev. 130, pp. 865, 1900.

[II -2]- H. G. Pollak et F. S. Cooper, physical revue 56, pp. 170-175, 1939.

[II -3]- KALI-CHIMIE, notice d'information sur les différents gaz.

[II-4]- F.Y. Chu. "SF6 Decomposition in Gas-Insulated Equipment", IEEE. Trans. on Elec.Insul. Vol. EI. 21, N°.5, 1986.

[Mém]-Les décharges électriques dans les gaz isolants.juin 2010 université guelma.

[II-5]- **FaussetL.**, Fundamentals of Neural Networks. Architecture - Algorithms and Applications, *1st Edition, Printice Hall, Inc., 1994.*

[II-6]- **McCulloch** W. and W. Pitts, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol. 5, 1943, pp.115-133.

[II-7]- Rosenblatt F., The Perceptron: a Perceiving and Recognizing Automaton, Project PARA, Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Lab., 1957

[II.8]- **Widrow** B. and Hoff M., Adaptive switching circuits, WESCON Convention Record, NewYork: IRE, Vol. 4, 1960, pp.96-104.

[II.9]- **Minsky**M., et Papert S., Perceptrons, MIT Press, Cambridge, MA, 1969.

[II.10]- **Grosberg S.**, Adaptive Pattern Classification and Universal recoding, I : Parallel Development and coding of neural features detectors, Biological Cybernetics, Vol. 23, 1976, pp.121-134.

[II.11]- **Wu J. K.**, Neural Networks and Simulation Methods, 1st Edition, Marcel Dekker, Inc., 1994.

[II.12]- **Hopfield J.J.**, Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 79, 1982, pp.2554-2558.

[II.13]- **Ackley D.**, Hinton G. and Sejnowski T., A learning algorithm for Boltzmann machines Cognitive Science, Vol. 9, 1985, pp.147-169.

[II.14]- **Rumelhart D.E.**, Hinton G.E., and Williams R.J., Learning Internal Representations by Error Propagation. In Parallel Distributed Processing : Explorations in the Microstructures of Cognition, Vol. 1, D. Rumelhart and J. McClelland Eds. Cambridge: MIT Press, 1986, pp.318-362.

[II.15] - **Cybenko G.**, Approximation by superposition of a sigmoid function. Math. of Control, Signals and Systems, Vol. 2(4), 1989, pp.303-314.

[II.16]- **Funahashi K.** , On the Approximate Realization of Continuous Mappings by Neural Networks, Neural Networks, Vol. 2, 1989, pp.183-192.

[II.17]- **Hornik K.**, Stinchcombe M. and White H., Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators, Neural Networks, Vol. 2, 1989, pp.359-366.

[II.18]- **Hornik K.**, Stinchcombe M. and White H. and Auer P., Degree of approximation results for feedforward networks approximating unknown mappings and their derivatives, Neural Computation, Vol. 6, 1994, pp.1262-1275.

[II.19]- Guerroui Assia Thèse de doctorat « Prédiction des paramètres des décharges couronnes dans le mélange SF₆-N₂ » juin 2016 université de Guelma.

Chapitre III

[III.1]- Dr-Lemzadmi-Ahcene these « étude des propriétés diélectriques des gaz isolants sous pression en vue de nouvelles applications» Juillet 2006.