

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2025



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** Allali Mohamed Bourhane Eddine et Lamari Kamel

### Thème

**Etude des décharges électriques dans les isolants en  
particulier le mélange SF<sub>6</sub>—N<sub>2</sub>**

Soutenu publiquement, le .... / ..... / ....., devant le jury composé de:

M. Lemzadmi Ahcene  
Mme. Guerroui Assia  
M. Beloucif Faissel  
M. Boudefel Amar

Professeur  
MCB  
MCA  
MCA

Univ. Guelma Président et Encadreur  
Univ. Guelma Co-Encadreur  
Univ. Guelma Examineur Principale  
Univ. Guelma Examineur

**Année Universitaire: 2024/2025**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَفَوْقَ كُلِّ ذِي عِلْمٍ عَلِيمٌ

(76)

يوسف

## REMERCIEMENT

JE TIENS À EXPRIMER MA SINCÈRE GRATITUDE À TOUTES  
LES PERSONNES QUI M'ONT SOUTENU ET AIDÉ DANS LA  
RÉALISATION DE CE MÉMOIRE.

TOUT D'ABORD, UN IMMENSE MERCI À MON ENCADRANT 'PR.  
LEMZADMI AHCENE POUR CES CONSEILS PRÉCIEUX, SON  
ACCOMPAGNEMENT ET DISPONIBILITÉ, SANS OUBLIER UN  
GRAND MERCI AU 'DR. GUERROUI ASSIA.

JE REMERCIE ÉGALEMENT MA FAMILLE, QUI M'A TOUJOURS  
SOUTENU MORALEMENT ET ENCOURAGÉ À PERSÉVÉRER  
DANS LES MOMENTS DIFFICILES.

UN GRAND MERCI À MES AMIS ET CAMARADES DE  
PROMOTION POUR LEUR AIDE, LEUR MOTIVATION ET TOUS  
CES MOMENTS DE PARTAGES QUI ONT RENDU CETTE  
EXPÉRIENCE PLUS AGRÉABLE.

ENFIN, JE REMERCIE MOI-MÊME POUR AVOIR TENU BON  
JUSQU'AU BOUT, MALGRÉ LE STRESS ET LES NUITS  
BLANCHES

## DÉDICACE

TOUT D'ABORD, MERCI À DIEU, SEIGNEUR DES MONDES, QUI M'A AIDÉ DANS CE TRAVAIL.

JE TIENS À REMERCIER MES PARENTS QUI M'ONT SOUTENU ET ONT CRU EN MOI TOUT AU LONG DE MON PARCOURS UNIVERSITAIRE.

JE TIENS ÉGALEMENT À REMERCIER TOUS MES PROFESSEURS, AUPRÈS DESQUELS J'AI BEAUCOUP APPRIS. JE REMERCIE ÉGALEMENT MES COLLÈGUES, QUI ONT ÉTÉ DE BONNES CONNAISSANCES, EN PARTICULIER MON AMI ET PARTENAIRE DANS CE TRAVAIL.

MOHAMED

## DÉDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL :

À MES CHERS PARENTS QUI ONT ÉTÉ TOUJOURS À  
MES CÔTÉS ET QU'ILS TROUVENT MOI LA SOURCE DE LEUR  
FIERTÉ

À TOUTES MES SŒURS ET MON FRÈRE LOUAY

À TOUTE MA FAMILLE

À TOUTS MES AMIS

À TOUTS LES GENS QUI ME CONNAISSENT ET QUE JE  
CONNAIS EN PARTICULIER

KAMEL

## Résumé :

### 1. généralités sur les isolants électriques :

Dans ce chapitre, nous discutons des différents types d'isolants électriques, découvrons leurs types et leurs différentes propriétés, et découvrons également les facteurs physiques et les phénomènes qui les affectent.

### 2. Décharge couronne dans le SF<sub>6</sub> :

Dans ce chapitre, nous discuterons de la définition du gaz hexafluorure de soufre, de ses diverses propriétés électriques et physiques, des facteurs qui l'affectent et de ses avantages et inconvénients.

### 3. Caractéristiques des paramètres des décharges couronne dans SF<sub>6</sub> :

Dans ce chapitre, nous simulons un mélange de gaz hexafluorure de soufre avec du gaz azote et comparons les résultats de la simulation avec les résultats d'expériences réelles.

## Summary:

### 1.General information about electrical insulators:

In this chapter, we discuss the different types of electrical insulators, explore their types and various properties, and identify the physical factors and phenomena that affect them.

### 2. Corona discharge in SF<sub>6</sub> gas:

In this chapter, we will discuss the definition of sulfur hexafluoride gas, its various electrical and physical properties, the factors that affect it, as well as its advantages and disadvantages.

### 3.Characteristics of corona discharge parameters in SF<sub>6</sub> gas:

In this chapter, we simulate a mixture of sulfur hexafluoride gas with nitrogen gas and compare the simulation results with those of real experiments.

## الملخص :

### 1.معلومات عامة عن العوازل الكهربائية:

في هذا الفصل ، نناقش الأنواع المختلفة من العوازل الكهربائية ، ونتعرف على أنواعها وخصائصها المختلفة ، كما نكتشف العوامل الفيزيائية والظواهر التي تؤثر عليها.

### 2.تفريغ الإكليل في غاز SF<sub>6</sub>:

في هذا الفصل ، سنناقش تعريف غاز سداسي فلوريد الكبريت ، وخصائصه الكهربائية والفيزيائية المختلفة ، والعوامل التي تؤثر عليه ، بالإضافة إلى مميزاته وعيوبه.

### 3.خصائص معلمات تفريغ الإكليل في غاز SF<sub>6</sub>:

في هذا الفصل ، نقوم بمحاكاة خليط من غاز سداسي فلوريد الكبريت مع غاز النيتروجين ، ونقارن نتائج المحاكاة مع نتائج التجارب الحقيقية .

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les isolants électriques</b>	
<b>I.1.Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Généralités</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1.Propriétés électriques des isolants</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1.1 Permittivité</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1.2 Angle de pertes et facteur de dissipation</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1.3 Rigidité diélectrique</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1.4 Résistivités transversale, superficielle et résistance d'isolement</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1.4.1 Définition et signification</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1.5 Décharge disruptive ou claquage</b>	<b>7</b>
<b>I.3. Les diélectriques</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1. Les diélectriques solides</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1.1. Conduction électrique dans les solides</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1.2. Mécanismes de claquage dans les diélectriques solides</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1.3. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique</b>	<b>9</b>
<b>I.3.1.4. Vieillessement des isolants solides sous l'effet du champ</b>	<b>10</b>
<b>I.3.1.5. Tenue des matériaux isolants solides aux contraintes thermiques</b>	<b>10</b>
<b>I.3.1.6.l'arborescence</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1.7. Tenue des matériaux isolants solides aux contraintes mécaniques</b>	<b>11</b>
<b>I.3.2. Les diélectriques liquides</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2.1. claquage dans les liquides</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2.1.1. Mécanisme de claquage avec phase gazeuse</b>	<b>13</b>
<b>I.3.2.2. Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique</b>	<b>13</b>
<b>I.3.3. Les diélectriques gazeux</b>	<b>14</b>
<b>I.3.3.1. Caractérisation des décharges gazeuses</b>	<b>15</b>
<b>I.3.3.2. Principe de base et phénomènes d'amorçage en tension continue</b>	<b>15</b>
<b>I.3.3.3 Caractéristiques de la décharge</b>	<b>16</b>
<b>I.3.3.4. Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique</b>	<b>17</b>
<b>I.3.3.5.Les coefficient de Townsend</b>	<b>18</b>
<b>I.3.3.5.1.Nature du gaz</b>	<b>18</b>

<b>I.3.3.5.2. Champ électrique</b>	<b>18</b>
<b>I.3.3.5.3. Pression</b>	<b>18</b>
<b>I.3.3.5.4. Deuxième coefficient de Townsend</b>	<b>19</b>
<b>I.3.3.6. Loi de Paschen</b>	<b>19</b>
<b>I.3.3.7. Remarques sur la loi de Paschen</b>	<b>20</b>
<b>I.3.3.8. l'effet de streamer et leader</b>	<b>21</b>

## **Chapitre II : Décharge couronne dans le SF<sub>6</sub>**

<b>II.1. Introduction</b>	<b>24</b>
<b>II.2. Généralités sur SF<sub>6</sub></b>	<b>24</b>
<b>II.2.1. Historique sur le SF<sub>6</sub></b>	<b>24</b>
<b>II.3. Propriétés du SF<sub>6</sub></b>	<b>24</b>
<b>II.3.1. Propriétés physico-chimiques du SF<sub>6</sub></b>	<b>24</b>
<b>II.3.2. Propriétés électriques, thermiques et biologiques</b>	<b>25</b>
<b>II.3.2.1. Rigidité diélectrique</b>	<b>25</b>
<b>II.3.2.2. Propriétés thermiques</b>	<b>26</b>
<b>II.3.2.3. Propriétés biologiques et environnementales</b>	<b>26</b>
<b>II.4. Les décharges couronnes dans le SF<sub>6</sub></b>	<b>27</b>
<b>II.4.1. Processus de calquage en champ fortement divergent</b>	<b>27</b>
<b>II.4.2. Détermination de la tension seuil de la décharge couronne dans le SF<sub>6</sub></b>	<b>30</b>
<b>II.4.3. Facteurs influençant la tenue diélectrique du SF<sub>6</sub></b>	<b>31</b>
<b>II.5. Comparaison entre le SF<sub>6</sub> et des gazes</b>	<b>32</b>
<b>II .6. Décomposition de SF<sub>6</sub></b>	<b>32</b>
<b>II .7. Les inconvénients du SF<sub>6</sub></b>	<b>33</b>
<b>II.7.1. Fort potentiel de réchauffement global (PRG)</b>	<b>33</b>
<b>II.7.2. Longue durée de vie dans l'atmosphère</b>	<b>33</b>
<b>II.7.3. Formation de sous-produits toxiques lors des arcs électriques</b>	<b>33</b>
<b>II.7.4. Nécessité des procédures de manipulation strictes</b>	<b>34</b>
<b>II.7.5. Coût environnemental et financier croissant</b>	<b>34</b>
<b>II .8. Etudes des possibilités de remplacement du SF<sub>6</sub></b>	<b>34</b>
<b>II.8.1 Les mélanges du SF<sub>6</sub> avec l' N<sub>2</sub></b>	<b>35</b>
<b>II.9. Les réseaux de neurones</b>	<b>35</b>
<b>II.9.1. Introduction</b>	<b>35</b>
<b>II.9.2. Historique</b>	<b>36</b>

<b>II.9.3. Les neurones formels</b>	<b>38</b>
<b>II.9.3.1. Différents types de neurones</b>	<b>39</b>
<b>II.9.4. Les réseaux de neurones formels</b>	<b>42</b>
<b>II.10. Perceptron multicouches (PMC)</b>	<b>42</b>
<b>II.11. Propriétés des Réseaux de Neurones Formels</b>	<b>43</b>
<b>II.12. Apprentissage d'un réseau de neurones</b>	<b>44</b>
<b>II.12. 1. Type d'apprentissage</b>	<b>44</b>
<b>II.13. Validation et Tests</b>	<b>44</b>
<b>II.14. Choix de l'architecture</b>	<b>46</b>

### **Chapitre III : Prédiction des tensions seuils dans les mélanges SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>**

<b>III.1. Introduction</b>	<b>48</b>
<b>III.2. Implémentation et simulation</b>	<b>48</b>
<b>III.2.1. Création des données</b>	<b>48</b>
<b>III.2.2. Création du réseau</b>	<b>48</b>
<b>III.2.3. Méthodes d'apprentissage</b>	<b>48</b>
<b>III.2.4. Application du RNA</b>	<b>49</b>
<b>III.2.4.1. Modèle de réseau de neurone</b>	<b>49</b>
<b>III.2.4.2. Résultat du nombre des neurones cachés et des couches cachées</b>	<b>50</b>
<b>III.2.4.3. Création du RNA en utilisant l'interface graphique de l'utilitaire nntool</b>	<b>50</b>
<b>III.2.4.4. Performance du réseau</b>	<b>51</b>
<b>III.3. Conclusion</b>	<b>54</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>55</b>

## **Listes des figures :**

### **Chapitre I :**

Figure I.1 : Angle des pertes.

Figure I.2 : Arborescence.

Figure I.3: Caractéristique d'une décharge gazeuse.

Figure I.4: Avalanche électronique.

Figure I.5 : Courbe de Paschen dans SF<sub>6</sub>.

Figure I.6 : Courbe de tension et courant démontrant l'effet de streamer et leader

### **Chapitre II :**

Figure II.1 : Structure moléculaire de l'hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub>

Figure II.2 : Décharge couronne en pointe – plan dans le SF<sub>6</sub>

Figure II.3 : Effet de pression en tension

Figure II.4 : neurone formel

Figure II.5 : fonction échelon

Figure II.6 : fonction tangente hyperbolique

Figure II.7 : fonction sigmoïde unipolaire

Figure II.8 : fonction sigmoïde bipolaire

Figure II.9 : perceptron multicouche à une couche cachée

Figure II.10 : organigramme de conception d'un réseau de neurone

### **Chapitre III :**

Figure III.1 : Interface graphique « nntool

Figure III.2 : Paramètres du RNA dans le cas d'utilisation deux couches cachées et 10 neurones par couche.

Figure III.3 : Fenêtre de l'apprentissage de l'outil " nntool" dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 2 neurones par couche

Figure III.4 : Structure de RNA dans le cas d'utilisation 10 couches cachées et 2 neurones par couche.

Figure III.5 : courbes de régression

Figure III.6 : Courbes des tensions seuils mesurées et prédites en utilisant les réseaux Neurons ANN pour des mélanges de SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> et à des pressions variables en polarité négative

Figure III.7 : Tensions seuils prédites par ANN pour des mélanges de SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> et à des pressions non couvertes par l'expérimentation

Figure III.8 : Evolution de l'erreur de prédiction

**Listes des tableaux :**

**Chapitre II :**

Tableau II.1 : tableau de propriétés de SF<sub>6</sub>.

Tableau II.2 : Tableau de M.V.E de SF<sub>6</sub> et son mélange.

Tableau II.3 : comparaison entre SF<sub>6</sub> et autres gazes

Tableau II.4 : comparaison de rigidité et point d'ébullition entre SF<sub>6</sub> et son mélanges

## **Introduction générale :**

L'électricité est aujourd'hui la colonne vertébrale de l'économie mondiale et de la vie humaine en général.

Sans elle, l'homme moderne ne peut accomplir les tâches les plus simples qui lui sont confiées. En raison de cette dépendance absolue envers cette ressource, l'homme a cherché à la maîtriser en inventant différentes méthodes pour protéger les personnes et les machines d'un échappement de cette ressource hors de contrôle humain.

La fiabilité et la longévité des systèmes d'isolation électrique sont d'une importance capitale dans les équipements haute tension, les systèmes de transmission de puissance et les appareils électroniques modernes.

Les matériaux isolants sont conçus pour résister aux contraintes électriques et empêcher tout flux de courant involontaire ; cependant, dans certaines conditions, ils peuvent subir des décharges électriques pouvant dégrader, voire détruire leurs propriétés isolantes.

Comprendre les mécanismes des décharges électriques dans les isolateurs est donc essentiel pour la conception, la maintenance et la prévention des pannes des systèmes électriques.

Les décharges électriques dans les isolants, y compris les phénomènes tels que les décharges partielles, les décharges de surface et les événements de claquage, sont des processus complexes influencés par les propriétés des matériaux, les configurations géométriques, les conditions environnementales et les tensions appliquées.

Ces décharges ne sont pas seulement des indicateurs de détérioration de l'isolation mais aussi des précurseurs potentiels d'une défaillance catastrophique. En tant que telle, leur étude est essentielle à la fois au développement théorique de la physique diélectrique et à l'application pratique de l'ingénierie haute tension.

Dans ce travail, nous efforcerons de vous fournir toutes les informations disponibles sur ce sujet, qui sera divisé en trois parties :

1. généralités sur les isolants électriques.

Dans ce chapitre, nous discutons des différents types d'isolants électriques, découvrons leurs types et leurs différentes propriétés, et découvrons également les facteurs physiques et les phénomènes qui les affectent.

## 2. Décharge couronne dans le SF<sub>6</sub>.

Dans ce chapitre, nous discuterons de la définition du gaz hexafluorure de soufre, de ses diverses propriétés électriques et physiques, des facteurs qui l'affectent et de ses avantages et inconvénients.

## 3. Caractéristiques des paramètres des décharges couronne dans SF<sub>6</sub>.

Dans ce chapitre, nous simulons un mélange de gaz hexafluorure de soufre avec du gaz azote et comparons les résultats de la simulation avec les résultats d'expériences réelles.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les isolants électriques**

## **I.1. Introduction :**

Comprendre les propriétés électriques des différents matériaux est essentiel pour les concepteurs de systèmes électriques, car ces propriétés jouent un rôle central dans le choix des matériaux lors de la conception des systèmes. Le comportement électrique des matériaux varie considérablement, et on peut généralement classer ces matériaux en trois types : solides, liquides et gazeux.

Parmi les matériaux les plus importants figurent les isolants, qui possèdent à leur tour des propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques, distinguant chaque isolant des autres. Le choix entre ces isolants dépend de l'application et de l'environnement de travail.

Les isolants sont utilisés pour :

- Assurer la séparation électrique entre les conducteurs de potentiels différents afin de protéger les personnes et les équipements
- Isoler les conducteurs de la terre.

Dans ce chapitre, nous allons analyser les propriétés des matériaux isolants et étudier les facteurs influençant les phénomènes de décharges électriques.

## **I.2. Généralités :**

### **I.2.1. Propriétés électriques des isolants :**

Les caractéristiques électriques essentielles des matériaux isolants sont:

- Permittivité relative  $\epsilon_r$
- Facteur de pertes diélectriques  $\tan \delta$
- Rigidité diélectrique  $E_d$
- Résistivité électrique  $\rho$
- Décharge disruptive ou claquage  $U_c$

#### **I.2.1.1. Permittivité :**

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre  $E_p$  à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique extérieur appliqué. Cette caractéristique des Isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

La permittivité relative d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité  $C_x$  entre deux électrodes supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité  $C_0$  de la configuration d'électrodes dans le vide:

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (\text{I-1})$$

La permittivité absolue  $\epsilon_d$  est le produit de la permittivité relative par la constante diélectrique du vide.

$$\epsilon_d = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I-2})$$

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (\text{I-3})$$

Dans le cas des diélectriques non parfaits, on définit de façon analogue une permittivité complexe relative qui tient compte de la dissipation d'énergie dans le diélectrique. Elle s'écrit:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (\text{I-4})$$

Où  $\epsilon_r'$  est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que  $\epsilon_r$  dans le cas des diélectriques parfaits.

$$\epsilon_d' = \epsilon_r' \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I-5})$$

### I.2.1.2 Angle de pertes et facteur de dissipation :

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants.

Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle  $\varphi < \pi/2$ . Son complément à  $\pi/2$  est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) et s'obtient de la façon suivante :

$$\tan \delta = \frac{I_c}{I_r} = \frac{U_c}{U_r} = \frac{P_c}{P_r} \quad (\text{I-6})$$

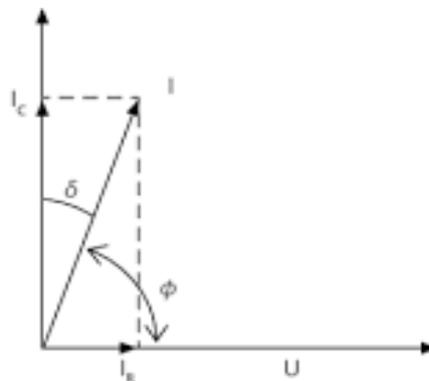


Figure I.1 : l'angle des pertes.

D'après la formule 3 ou la figure 1, on peut écrire :

$$\tan \delta = \varepsilon''_r / \varepsilon'_r \quad (I-7)$$

Le produit  $\varepsilon''_r = \varepsilon'_r \tan \delta$  est dénommé indice de pertes, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

### **I.2.1.3 Rigidité diélectrique :**

La rigidité diélectrique (RD) d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation (décharge électrique de rupture) dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes (épaisseur) auxquelles est appliquée la tension.

Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux on distingue:

- Rigidité diélectrique transversale (RDT), pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau.

Rigidité diélectrique longitudinale (RDL), obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant.

### **I.2.1.4 Résistivités transversale, superficielle et résistance d'isolement :**

#### **I.2.1.4.1 Définition et signification :**

La résistance transversale ou volumique ( $R_T$ ) est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

La résistance superficielle ( $R_S$ ) est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

La résistance d'isolement ( $R_I$ ) fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

### **I.2.1.5. Décharge disruptive ou claquage :**

Le développement de la décharge disruptive à l'intérieur des matériaux isolants solides est lié à un ou une association des phénomènes suivants :

- Décharge intrinsèque ;
- Décharge thermique ;
- Décharge partielle.

D'autres causes secondaires telles que les effets électrochimiques et chimiques de détérioration de l'isolant [I-01]

### **I.3. Les diélectriques :**

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

#### **I.3.1. LES DIELECTRIQUES SOLIDES :**

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

##### **I.3.1.1. 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-02].

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  $V$ . La résistance  $R$  du fil se déduit de la loi d'Ohm:

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

La résistivité  $\rho$  du métal constituant le fil est donné par la formule :

$$\rho = \frac{Rs}{l} \quad (\text{I-9})$$

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  $S$ . 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 est donnée par (I-9).

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 :

$$\rho = \frac{Rs}{e} \quad (\text{I-10})$$

Cela n'aurait aucun intérêt car, dans ce cas, ( $\rho$ ) 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.

### **I.3.1.2. 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 collisions. [I-02]

**-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-02].

**I.3.1.3. 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 a l'annexe un tableau qui contient quelques valeurs de rigidité électriques des matériaux isolants.

#### **I.3.1.4. 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-02]

#### **I.3.1.5. 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 différentes suivant la catégorie à laquelle elles appartiennent. Parmi les caractéristiques thermiques, le coefficient de dilatation thermique linéaire, la conductivité thermique et la capacité thermique.

#### **I.3.1.6. l'arborescence :**



Figure I.2 : l'arborescence.

De telles réductions de  $E$ , 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 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.3.1.7. 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-02].

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.3.2. DIELECTRIQUES LIQUIDES :**

#### **I.3.2.1. 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-03].

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-03]

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.3.2.1.1. 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-03].

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 [I-02], 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 :

$$I = AV^n \quad (I-11)$$

Avec:

A: cte

$1.5 < n \leq 2$

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-02].

### **I.3.2.2. 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-03]

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

**2. Pression hydrostatique :** L'augmentation de la pression hydrostatique améliore la rigidité diélectrique du liquide.

**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).

**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.

**5. Nombre de claquages :** Il a été observé par plusieurs chercheurs [I-03], 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.

**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.

**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 $\mu$ s, le claquage a un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique.

### **I.3.3. Les diélectriques gazeux :**

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

### I.3.3.1. Caractérisation des décharges gazeuses :

### I.3.3.2. 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 provoque une ionisation. On peut écrire :

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{\left(-\frac{U}{eE\lambda}\right)} \quad (\text{I-12})$$

Où:

$\alpha$ : facteur d'ionisation

$\lambda$ : 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 donne 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  $E_a$  de la décharge au moyen de la formule suivante [I-05].

$$Ed = \frac{Ap}{(C+\ln(p.d))} b \quad (\text{I-13})$$

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 continu  $U$ , 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-05]

$$Uc = \frac{c1(p.d)}{c2+\ln(p.d)} \quad (\text{I-14})$$

Avec  $C1$  et  $C2$  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 luminescente 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.[I-04]

### I.3.3.3 Caractéristiques de la décharge :

Le plasma est défini électriquement par une caractéristique tension courant représenté dans la figure suivant :

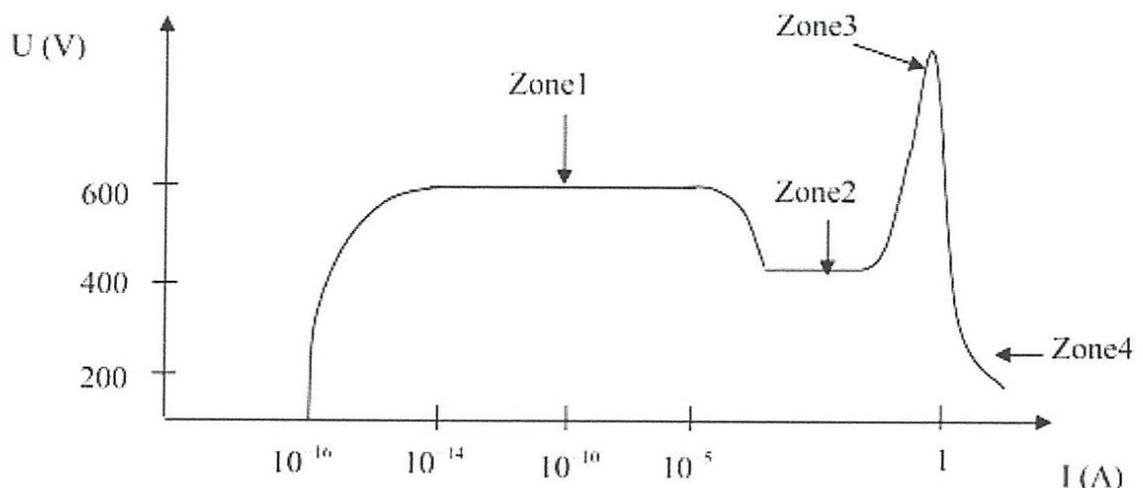


Figure I.3: caractéristique d'une décharge gazeuse.

(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 de Townsend est donné par la relation suivante :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1)} \quad (I-15)$$

Avec:

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

$\alpha$ : Le 1<sup>er</sup> facteur de Townsend.

$\gamma$ : Le coefficient d'émission d'électrons secondaires.

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

#### **I.3.3.4. 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.

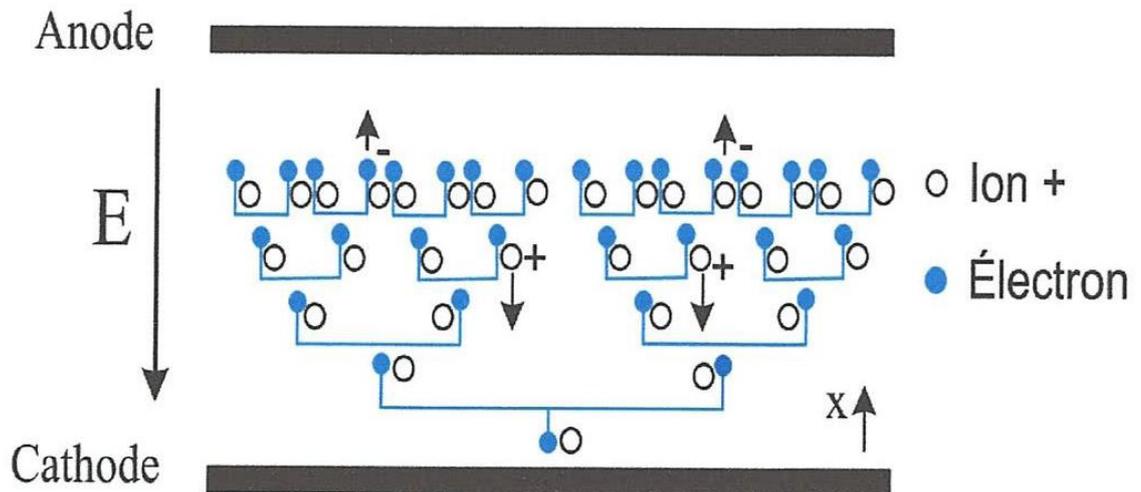


Figure I.4 : Avalanche électronique.

### I.3.3.5. Les coefficient de Townsend :

#### I.3.3.5.1. Nature du gaz :

Le 1<sup>er</sup> coefficient de Townsend est plus élevé dans le cas des gaz rares à cause de leur facilité d'ionisation (néon, argon, vapeur métallique,...) Les gaz électronégatifs plus difficilement ionisables, possèdent un coefficient de Townsend plus faible (cas du SF<sub>6</sub>, O<sub>2</sub>).

#### I.3.3.5.2. Champ électrique :

Il joue le rôle de facteur ionisant externe.

#### I.3.3.5.3. Pression :

On sait que la densité des gaz est proportionnelle à sa pression et celle-ci représente un facteur important dans le mécanisme d'avalanche.

Townsend a proposé une expression analytique de la dépendance simultanée de la pression et du champ électrique qui est la suivante :

$$\frac{\alpha}{P} = A. e^{\frac{-BP}{E}} \quad (I-16)$$

A et B sont des constantes dépendant de la nature du gaz. Par exemple pour l'air, si la pression P est en mmHg, E en V/cm et, A= 15 et B =365.

L'expression (I-16) est valable dans le domaine des E/P compris entre 100 et 800

#### I.3.3.5.4. Deuxième coefficient de Townsend :

Pour des valeurs élevées de  $E/P$ , interviennent un certain nombre d'effets secondaires comme la charge d'espace, l'émission secondaire due aux ions positifs bombardant la cathode et la photo émission [I-06].

De tous ces effets, c'est l'émission cathodique qui prédomine. Townsend a introduit un coefficient  $\gamma$  qui caractérise le nombre d'électrons émis par la cathode par ion incident. Ce coefficient dépend aussi de la pression et du champ électrique. Sa dépendance en fonction de la variable réduite ( $E / P$ ) est donnée sur la figure 3 pour différents Tenant compte de cet effet, la densité de courant d'avalanche s'écrit alors :

$$j = \frac{j_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma [e^{\alpha d} - 1]} \quad (I-17)$$

#### I.3.3.6. Loi de Paschen :

Partant de la condition d'amorçage d'une décharge autonome  $\gamma [e^{\alpha d}] > 1$  et si le gaz est placé entre deux électrodes planes et parallèles séparées par une distance  $d$ , cette condition devient:

$$(\alpha d) > \log\left(\frac{1}{\gamma}\right) \quad (I-18)$$

en déduisant  $\alpha$  de l'expression (I-16) et en le remplaçant dans (I-18), on aboutit à l'expression suivante:

$$\alpha d = pdAe^{\frac{-BP}{E}} > \log\left(\frac{1}{\gamma}\right) \quad (I-19)$$

En géométrie plane et parallèle, le champ est égale au champ harmonique ( $E = V / d$ ) l'expression (I-19) peut s'écrire sous la forme

$$V = \frac{Bpd}{\log[kF(pd)]} = Bpd / \log[k.F(pd)] \quad (I-20).$$

Dans cette expression,  $k$  est une constante pour un gaz donné et  $F(pd)$  est une fonction du produit  $pd$ .

L'expression (I-20) est appelée loi de Paschen. Elle montre qu'entre électrodes planes et parallèles séparées par une distance  $d$ , un gaz à la pression  $p$  n'est source de décharge autonome que si la tension  $V$  qui lui est appliquée est supérieure à la quantité  $Bpd / \log[k.F(pd)]$ . La représentation de la variation  $V = f(Pd)$  donne ce qu'on appelle des courbes de Paschen. Sur la figure 7, nous donnons à titre d'exemple les courbes de Paschen dans le  $SF_6$  [I-06].

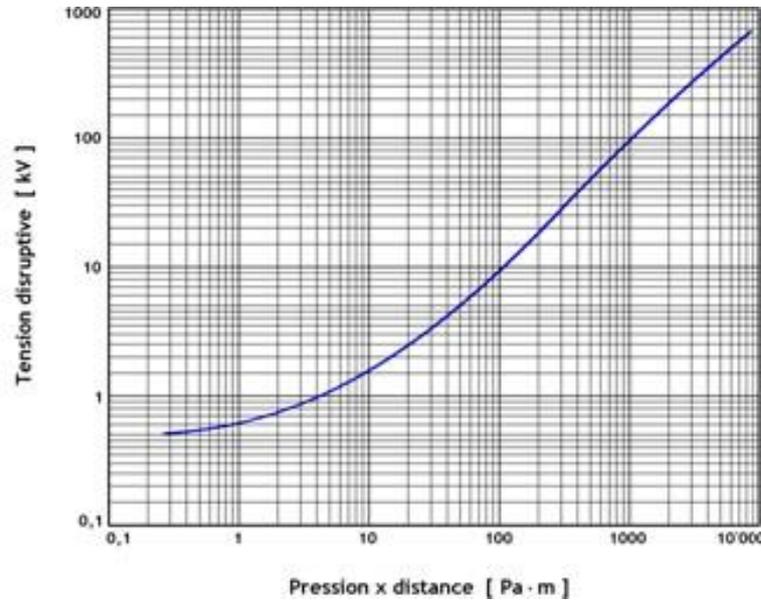


Figure I.5 : Courbe de paschen dans SF<sub>6</sub>.

### I.3.3.7. Remarques sur la loi de Paschen:

- La courbe de Paschen présente un minimum qui correspond à 300-400 V dans l'air à la pression atmosphérique. Ce minimum est assez mal défini et dépend de l'état des électrodes (leur nature) et du gaz. Cela signifie qu'au-dessous de cette tension aucun amorçage n'est possible. C'est ainsi qu'à 220 V, nous aurons seulement des étincelles de rupture de tension inductive et jamais d'étincelles dues à la tension elle-même.
- La partie gauche de la courbe de Paschen ne signifie pas réellement que  $V$  tend vers l'infini quand  $pd$  tend vers zéro. Si la distance inter électrode devient du même ordre que le libre parcours moyen (LPM), la décharge est alors causée par des phénomènes autres que l'ionisation du gaz.
- La condition d'amorçage donnée par l'expression (I-19) est nécessaire mais non suffisante. En plus de cette condition, pour que l'amorçage soit possible, il faut l'existence de germes favorablement placés.
- Le calcul suppose implicitement que  $y$  est une constante. Ceci est inexact car suivant la distance inter électrode les phénomènes secondaires seront différents.
- La validité expérimentale de la loi de Paschen est vérifiée aux faibles distances jusqu'à  $a = 0,1$  mm et à des pressions jusqu'à 10 atmosphères [I-06].

### I.3.3.8. Effet de streamer et leader :

En électromagnétisme, une décharge en banderoles, également connue sous le nom de décharge filamentaire, est un type de décharge électrique transitoire qui se forme à la surface d'une électrode conductrice transportant une haute tension dans un milieu isolant tel que l'air. Les streamers sont des étincelles lumineuses se tordant et se ramifiant, des canaux de plasma composés de molécules d'air ionisées, qui jaillissent à plusieurs reprises de l'électrode dans l'air.

Si une banderole atteint le conducteur de polarité opposée, elle crée un chemin conducteur ionisé à travers lequel un courant important peut circuler, libérant une grande quantité de chaleur, entraînant un arc électrique ; c'est le processus par lequel les chefs de foudre créent un chemin pour les éclairs.

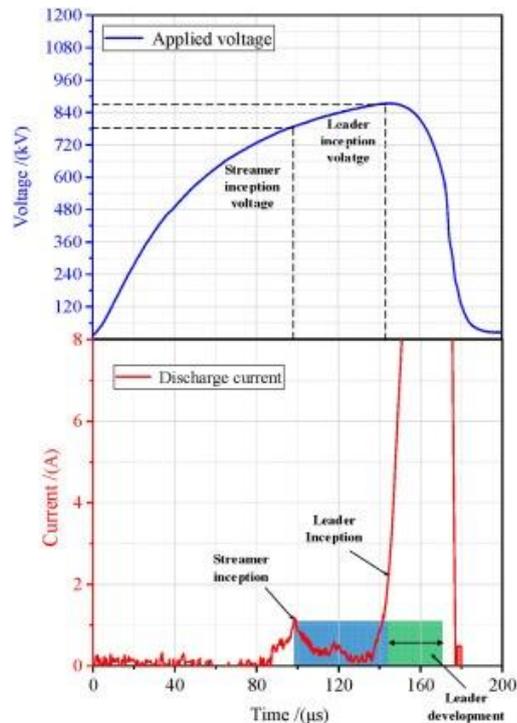


Figure I.6 : des courbes de tension et courant démontrant l'effet de streamer et leader.

Dans le graphique supérieur, qui représente la tension appliquée en fonction du temps, on observe que la tension augmente jusqu'à atteindre 680 kV, moment où apparaissent pour la première fois les pré-décharges. Ce sont de petits canaux ionisés qui précèdent les arcs électriques. La tension continue ensuite à augmenter jusqu'à 860 kV, où se forme le leader, un canal de plasma plus conducteur que la pré-décharge, ce qui indique que la décharge devient plus intense. Ce processus est considéré comme une étape préliminaire directe à l'apparition de l'arc électrique complet.

Quant au graphique inférieur, il représente le courant de décharge en fonction du temps. On remarque que le courant peut être divisé en plusieurs phases temporelles. Avant

80 microsecondes, le courant est proche de zéro. De 80 à 120 microsecondes, on observe une montée du courant vers 1 ampère, ce qui indique la formation des canaux. De 120 à 160 microsecondes, le saut de la valeur du courant indique le début de la formation du leader. Après 160 microsecondes, la phase de développement du leader devient active, et cette étape est généralement suivie par un arc électrique complet.

Ainsi, la formation d'un arc électrique suit plusieurs étapes :

1. Une augmentation de la tension sans courant,
2. Une ionisation progressive,
3. L'apparition de courants,
4. La formation du leader,
5. Et enfin, après le développement du leader, une forte décharge ou un arc électrique.

# Chapitre II

## Décharge couronne dans le $SF_6$

## II.1.Introduction :

Le gaz hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) est considéré comme l'un des gaz isolants les plus importants dans le domaine de l'isolation électrique, notamment dans les équipements à haute tension tels que les disjoncteurs, les appareillages isolés au gaz (GIS) et les condensateurs.

Cela est dû à ses caractéristiques uniques, que nous allons découvrir et approfondir dans ce chapitre.

## II.2. Généralités sur $\text{SF}_6$ :

### II.2.1. Historique sur le $\text{SF}_6$ :

Le  $\text{SF}_6$ , fut fabriqué pour la première fois en 1900 par H. Moissan et P. Lebeau [II-01] 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-02] qui étudièrent le comportement électrique du  $\text{SF}_6$  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  $\text{SF}_6$ , comme un gaz isolant dans le domaine de l'électrotechnique de haute tension.

## II.3. Propriétés du $\text{SF}_6$ :

### II.3.1. Propriétés physico-chimiques du $\text{SF}_6$ :

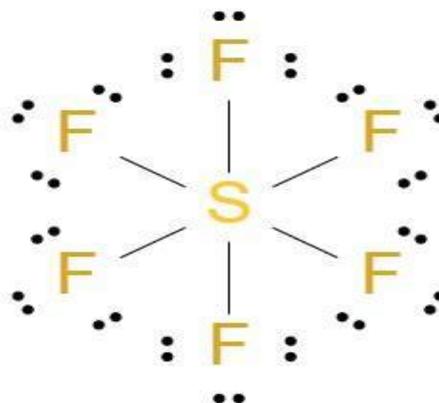


Figure II.1 : Structure moléculaire de l'hexafluorure de soufre  $\text{SF}_6$

La structure moléculaire du  $\text{SF}_6$  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 SF<sub>6</sub> 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

### II.3.2. Propriétés électriques, thermiques et biologiques:

Tableau II.1 : Tableau de propriétés de SF<sub>6</sub>.

<i>Masse molaire moléculaire</i>	146,050418 g.mol <sup>-1</sup>
<i>Masse volumique</i>	6,602 kg.m <sup>-3</sup> 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 <sub>p</sub> =0,159kcal.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> à T=298,15K et P=101,3 kPa
<i>Entropie</i>	S <sup>o</sup> =-291,535 J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> à T=298,15 K
<i>Enthalpie de formation</i>	ΔH <sup>o</sup> <sub>f</sub> = - 1220,473 kJ.mol <sup>-1</sup> à T=298,15 K ΔH <sup>o</sup> <sub>f</sub> = - 1206,501 kJ.mol <sup>-1</sup> à T=0 K
<i>Conductivité thermique à P=101,3 kPa</i>	κ=2,88.10 <sup>-5</sup> cal.cm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> à T=273,15 K κ=3,14.10 <sup>-5</sup> cal.cm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> à T=288,15 K κ=3,80.10 <sup>-5</sup> cal.cm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> à T=323,15 K κ=4,72.10 <sup>-5</sup> cal.cm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> à T=373,15 K
<i>Permittivité relative à P=94,4 kPa</i>	ε <sub>r</sub> =1,00191 à T=298,15 K

#### II.3.2.1. 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 plus le gaz en question est un bon diélectrique. La rigidité diélectrique du SF<sub>6</sub>, 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

SF<sub>6</sub> 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.3.2.2. 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  $\lambda$  est ainsi défini par la relation entre le flux de chaleur et le gradient de température [II-03]:

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

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 SF<sub>6</sub> .

### II.3.2.3. 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 SF<sub>6</sub> est susceptible de se décomposer en sous-produits biologiquement dangereux, le tableau II.2 indique les effets connus sur l'homme et la V.M.E. de certains sous-produits [II-04]:

Tableau II.2 : Tableau de M.V.E de SF<sub>6</sub> et son mélange.

	NOM	TOXICOLOGIE	V.M.E
SF <sub>6</sub>	Hexafluorure de soufre	Asphyxiant a concentration élevée par déplacement de l'oxygène . inodore.peu toxique et non agressif	1000
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Fluorure de sulfuryle	Convulsaient: blocage irréversible des muscles respiratoires (diaphragme). Inodore mais se forme avec d'autres gaz à odeur caractéristique	5
SOF <sub>2</sub>	Fluorure de thionyle	Agressif pulmonaire: œdème aigu du poumon irritation des yeux Odeur acre et nauséuse	0.63
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	Deca fluorure de disoufre	Agressif pulmonaire (plus toxique que le phosgène)	0.01

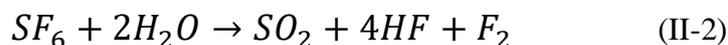
$SF_4$	Tetrafluorure de soufre	Agressif pulmonaire: difficultés respiratoires et irritation des muqueuses Odeur piquante décelable à faible concentration	0.1
$SOF_4$	TetraFluorure de thionyle	Agressif pulmonaire	0.63
$SO_2$	Anhydride sulfureux	Irritant violent Odeur suffocante: irrespirable	2
HF	Acide fluorhydrique	Irritant	3

### **Solubilité dans l'eau:**

Le coefficient de solubilité (dit de Bunsen) correspond au volume de gaz à 273,15 K et 1.013 mbar dissous par unité de volume de solvant à la température de l'expérience sous une pression partielle de ce gaz de 1.013 mbar. Pour le gaz  $SF_6$ , à 273,15 K: Coefficient de Bunsen  $\alpha=3.5$ [II-18]

### **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  $SF_6$ , très stable et avec des liaisons chimiques saturées. La décomposition thermique du SF, peut cependant survenir à partir 200°C au contact de certains matériaux (alliages au silicium par exemple)[II-19]; elle sera facilitée par la présence d'humidité et conduira à la formation de  $SO_2$  et HF suivant la réaction:



### **Absorption dans l'infrarouge :**

Contribution à l'effet de serre. Le SF, absorbe bien les radiations IR particulièrement à des longueurs d'onde de l'ordre de 10,5  $\mu m$  et sa durée de vie dans l'atmosphère est au moins égale à 3000 ans.

Cette longue durée de vie et sa forte capacité d'absorption dans l'infrarouge font du SF, un des principaux gaz à effet de serre même si sa participation relative reste pour l'instant faible. Le SF peut donc présenter à terme un problème de pollution important que l'on cherche à réduire notamment en le mélangeant à d'autres gaz ( $N_2$ ,  $CF_4$ ,  $CO_2$ )[II-20].

## **II.4. Les décharges couronnes dans le $SF_6$ :**

### **II.4.1.Processus de calquage en champ fortement divergent :**

Les équipements de haute tension utilisant le SF, 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 SF<sub>6</sub> :**

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.

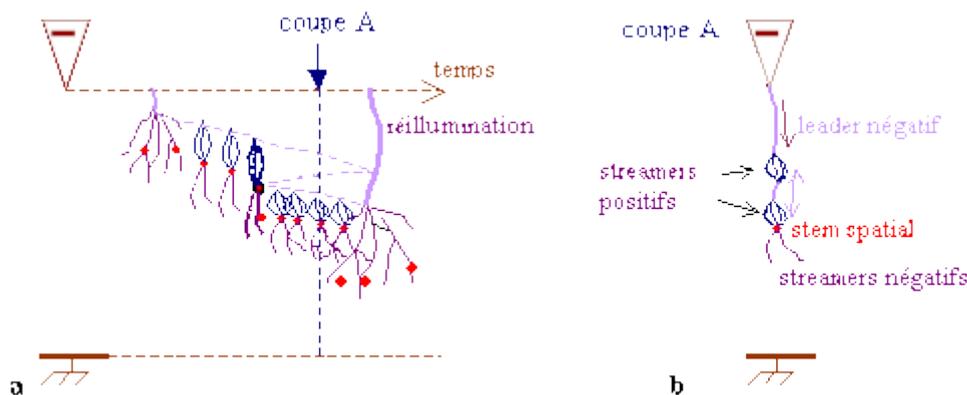


Figure II.2 : Décharge couronne en pointe – plan dans le SF<sub>6</sub>.

La figure II.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 de courant.

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

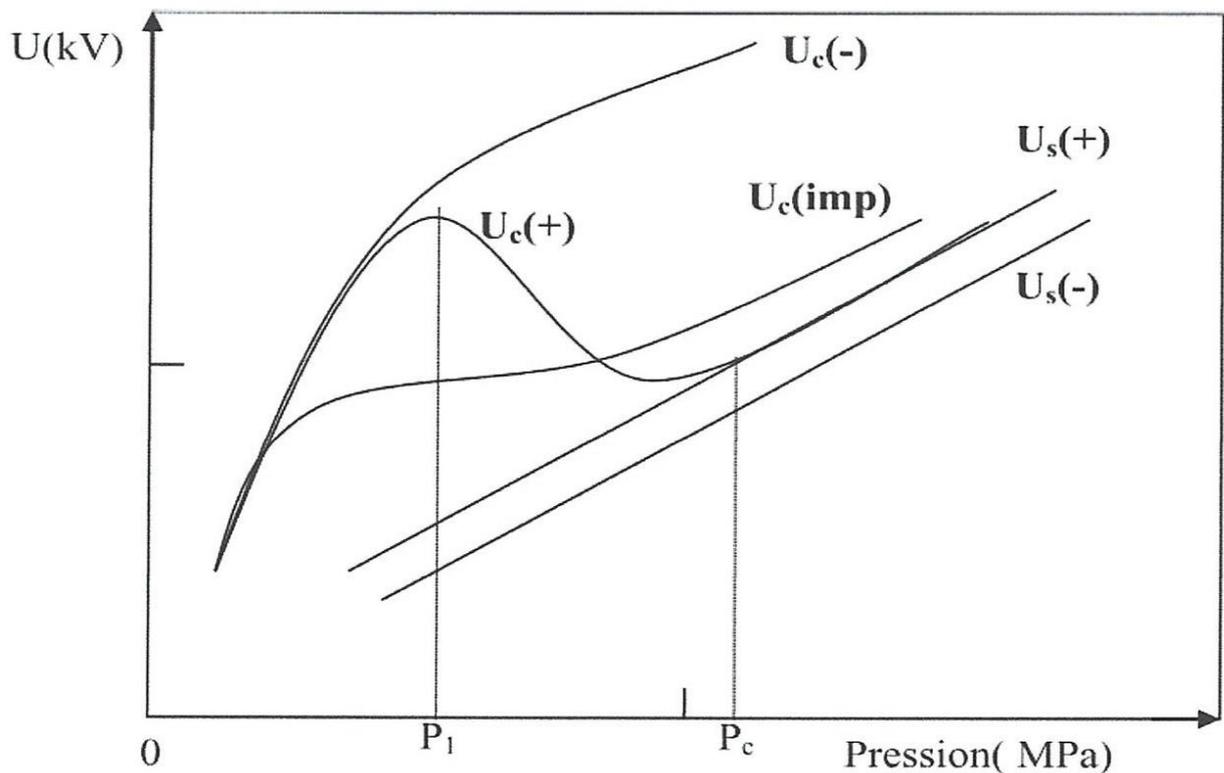


Figure II.3 : Effet de pression en tension.

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 [II-21], 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  $SF_6$ , 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.

#### **1.4.2. Détermination de la tension seuil de la décharge couronne dans le $SF_6$ :**

La forte électronégativité du  $SF_6$ , 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 [II-22] 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  $\int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx = K$

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

$\left(\frac{E}{p}\right)_{lim}$  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]:

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

$r_p$  est le rayon de la pointe.

La constante C est donnée par l'équation suivante:

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

Avec K correspondant au critère des streamers et la constante  $\beta$  vient d'une approximation du coefficient d'ionisation effectif  $\alpha$  du SF<sub>6</sub>:

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

#### II.4.3. Facteurs influençant la tenue diélectrique du SF<sub>6</sub> :

Le comportement du SF<sub>6</sub>, 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 influent 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 SF<sub>6</sub>, s'explique par le fait, qu'en raison justement de leur caractère conducteur, les lignes de champ électrique convergent à leur proximité. L'augmentation consécutive 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 SF<sub>6</sub>, 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.5.comparaison entre le SF<sub>6</sub> et des gazes :**

Tableau II.3 : Comparaison entre le SF<sub>6</sub> et des gazes.

Mâtereaux	Condition	Permittivité $\epsilon_r$	Rigidité $E_c$ (Mv/m)
Vide	0° c,1Atm	1	3
Air	0° c,1Atm	1,00069	3
HCL	0° c,1Atm	1,0046	5,5 a 6
H2O	110° c,1Atm	1,0126	4 a 6
SF6	20° c,1Atm	1,0025	8,9

**II .6. Décomposition de SF<sub>6</sub> :**

Malgré que le SF<sub>6</sub> est un gaz neutre , non-toxique et chimiquement stable il présente néanmoins des signes de toxicité issus de sa décomposition en présence d'une décharge électrique de. Ceux-ci peuvent être dangereux pour le personnel et le matériel .Pour plus de clarté on va considérer la décomposition dans les trois types de décharges électriques suivantes [II-03]:

**1) Décomposition dans une décharge arc:**

les produits issues de la décomposition sont: SOF<sub>2</sub> ; SF<sub>4</sub> ; SF<sub>2</sub>.

**2) Décomposition dans une décharge étincelle :**

SOF<sub>2</sub>; SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> ; SOF<sub>4</sub>. Par contre le S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> n'a pas été détecté.

**3) Décomposition dans une décharge couronne :**

Le SOF<sub>2</sub> a été fortement détecté ainsi que le SOF<sub>4</sub> et le SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> .une seule étude a détecté la présence du S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>.

**4) Décomposition thermique:**

Le taux de décomposition du SF<sub>6</sub> augmente avec l'augmentation de la température et les composés qui peuvent apparaître sont: SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> (650°C).

La toxicité des produits issus de la décomposition du SF<sub>6</sub> a été décelée dans les années cinquante.

Récemment des expériences ont été faites sur des rats ont mis en évidence la toxicité des produits: SF<sub>4</sub>, SF<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, SOF<sub>2</sub>, SOF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>4</sub>, S<sub>2</sub>OF<sub>4</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>10</sub> et HF à des degrés plus ou moins élevés.

Le produit S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> est plus particulièrement extrêmement dangereux pour le personnel ainsi que S<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>10</sub>.

## **II.7. Les inconvénients du SF<sub>6</sub>:**

Bien que le gaz SF<sub>6</sub> présente des propriétés isolantes exceptionnelles et soit largement utilisé dans les équipements électriques haute tension, il possède plusieurs inconvénients majeurs qui doivent être pris en considération :

### **II.7.1. Fort potentiel de réchauffement global (PRG) :**

Le SF<sub>6</sub> est l'un des gaz à effet de serre les plus puissants connus. Son potentiel de réchauffement global (Global Warming Potential - GWP) est environ 22 800 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub> sur une période de 100 ans. Une seule fuite de SF<sub>6</sub> peut donc avoir un impact climatique considérable [II-23].

### **II.7.2. Longue durée de vie dans l'atmosphère :**

Le SF<sub>6</sub> est extrêmement stable chimiquement, ce qui signifie qu'il persiste dans l'atmosphère pendant plus de 3 000 ans. Il ne se décompose pas naturellement, contribuant ainsi durablement à l'effet de serre.[II-20]

### **II.7.3. Formation de sous-produits toxiques lors des arcs électriques :**

Lorsqu'un arc électrique se produit à l'intérieur d'un appareil contenant du SF<sub>6</sub>, le gaz peut se décomposer et former des sous-produits toxiques et corrosifs, tels que :

- le fluorure d'hydrogène (HF),
- le trioxyde de soufre (SO<sub>3</sub>),
- des composés soufrés fluorés variés, parfois solides, appelés résidus blancs.

Ces produits peuvent représenter un danger pour la santé humaine et doivent être manipulés avec précaution lors des opérations de maintenance.

#### **II.7.4. Nécessité des procédures de manipulation strictes :**

Le SF<sub>6</sub> doit être manipulé et stocké conformément à des normes de sécurité strictes pour éviter les fuites et protéger les opérateurs. L'équipement nécessite souvent des dispositifs de détection et de récupération spécifiques, ce qui augmente la complexité et le coût des installations.

#### **II.7.5. Coût environnemental et financier croissant :**

En raison de la pression réglementaire croissante à l'échelle mondiale (en particulier dans l'Union européenne), l'utilisation du SF<sub>6</sub> est de plus en plus restreinte, ce qui pousse les fabricants à investir dans des technologies alternatives, souvent plus coûteuses à court terme.

#### **II .8. Etudes des possibilités de remplacement du SF<sub>6</sub>:**

Pour pouvoir remplacer le SF<sub>6</sub> les gaz et les mélanges doivent se conformer aux exigences suivantes.

1. Une propriété diélectrique acceptable.
2. La réduction du coût des installations et de fonctionnement.
3. Insensibilité aux effets des contaminants et des états des surfaces.
4. Respect de l'environnement.
5. Sécurité du personnel et des installations (moins de toxicité et corrosion)

Nous donnons dans ce qui suit les différentes tentatives en vue de chercher un gaz ou un mélange pouvant se substituer au SF<sub>6</sub>.

#### **Les mélanges fluorocarbones :**

Dans le tableau n ne présente que les mélanges dont la rigidité est supérieure à celle du SF<sub>6</sub>.

Tableau II.4 : Comparaison de rigidité et point d'ébullition entre SF<sub>6</sub> et son mélanges

Composé	E(V.cm-1.atm-1.10-5)	Point d'ébullition
SF <sub>6</sub>	0.850	-63.8
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	1.12	-2.5
C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	1.489	25
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	1.922	52
C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	1.110	-8

Ces composés ne peuvent pas satisfaire la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> conditions citées ci- dessus, en plus leur toxicité et leur stabilité ne sont pas connues sous les conditions réelles des claquages.

### **II.8.1. Les mélanges du SF6 avec l' N<sub>2</sub>:**

L'Azote(N<sub>2</sub>) est un gaz idéal dans les application d'isolation électrique. Il se trouve en abondance dans l'atmosphère , moins cher , neutre , non toxique , inflammable et environnement très acceptable.

L'Azote n'est pas un gaz électronégatif mais possède une capacité de ralentir les collisions électroniques en réduisant l'énergie des électrons. Le processus vibratoires intense tend à renvoyer les électrons dans la zone où la probabilité d'attachement du SF6 est élevée. La présence de l'Azote dans l'air lui donne un atout supplémentaire du point de vue coût. L.G.Christophorou et R.J. Van Brunt [II-24] ont fait un travail bibliographique considérable sur le SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub> et SF<sub>6</sub> / N<sub>2</sub> . Le but des auteurs est de mettre en évidence l'importance de l'utilisation du mélange SF<sub>6</sub> et N<sub>2</sub> . L'étude s'est concentrée sur les méthodes de calcul des paramètres essentiels tels que : la vitesse de dérive des électrons, le transport des porteurs de charges, le coefficient de diffusion/la mobilité , les coefficients d'ionisations, d'attachement et les coefficients d'ionisation secondaire ainsi que l'énergie moyenne d'un électron[II-05].

## **II.9. Les réseaux de neurones:**

### **II.9.1 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.9.2. Historique :**

### **- 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.06].

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.07].

### **- 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.08].

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.09]. 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.10].

### **-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.11] et [II.12].

### **-Le nouveau :**

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.13].

### **- 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.14].

-1986: L'algorithme d'apprentissage de rétro-propagation de gradient apparaît. [II.15] 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-16]. 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.17].a démontré la parcimonie des réseaux de neurones à une couche cachée, ce qui a permis d'étendre les champs d'application des réseaux de neurones aux applications en temps réel.

#### - 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.9.3. 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 donné 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.

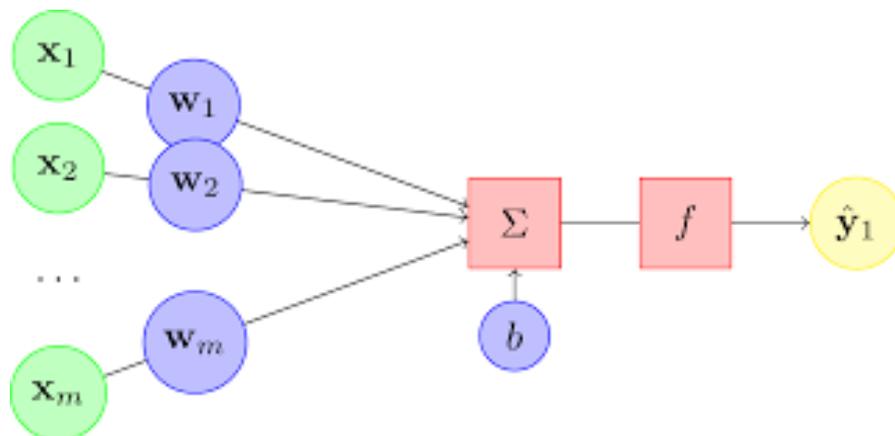


Figure II.4 : neurone formel

Où les  $x$ , sont les variables (ou entrées) du neurone, les  $w$ , 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.9.3.1. Différents types de neurones:

La fonction d'activation (de transfert) utilisée dans le modèle de McCulloch & Pitts est la fonction échelon (figure 6). 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: In fonction tangente hyperbolique définie par:

$$f(u) = \tanh(\beta u) = \frac{e^{\beta u} - e^{-\beta u}}{e^{\beta u} + e^{-\beta u}}$$

et la fonction logistique (Figure 1) dont l'expression est la suivante:

$$f_{\beta}(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta u}}$$

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:

$$\tanh(\beta u) = 2f_{\beta}(u) - 1$$

Où le paramètre  $\beta$  est appelé le gain. Plus le gain est important, plus la saturation du neurone est rapide (dans notre travail, le paramètre  $\beta$  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: (11.10)

$$f_{\beta}(u) = \frac{1 - e^{-\beta u}}{1 + e^{-\beta u}}$$

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 décrites peuvent s'exprimer facilement à l'aide des fonctions elles-mêmes, ce qui permet un gain significatif de temps de calcul.

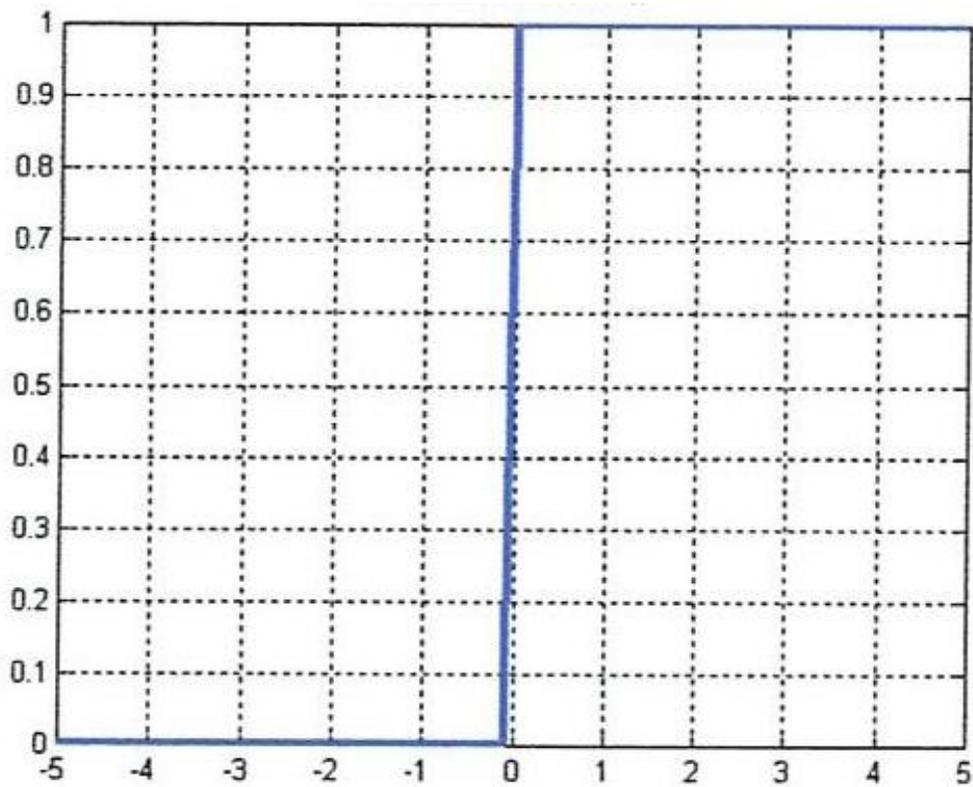


Figure II.5 : fonction échelon

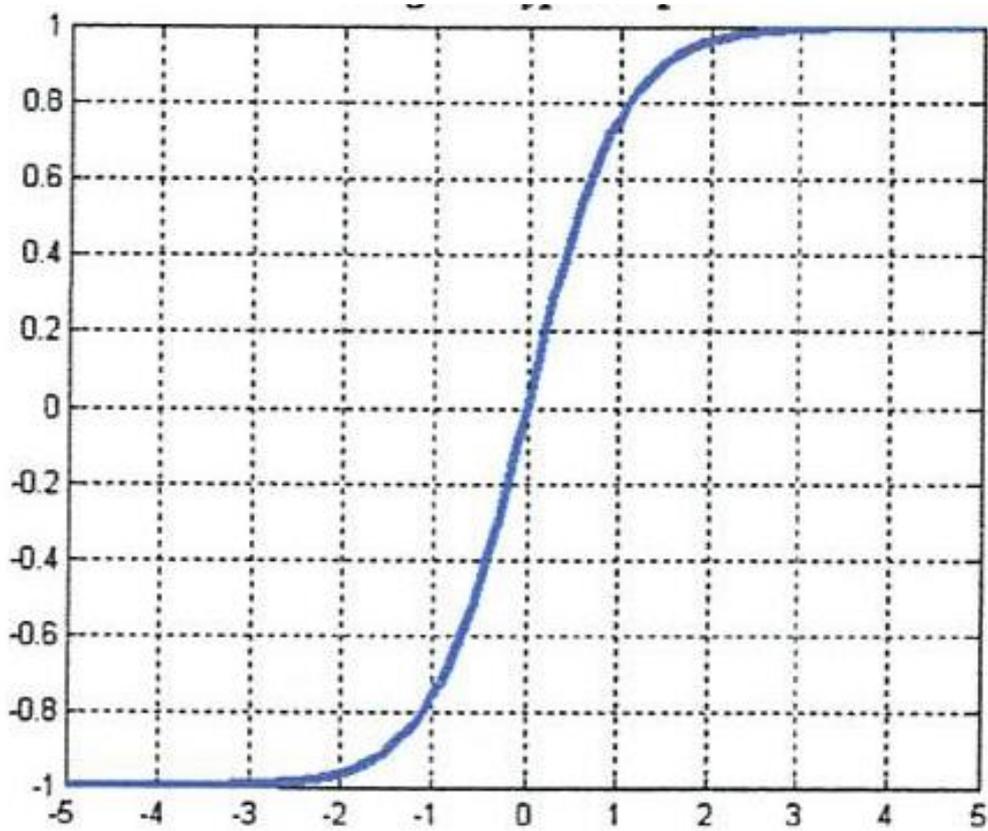


Figure II.6 : fonction tangente hyperbolique

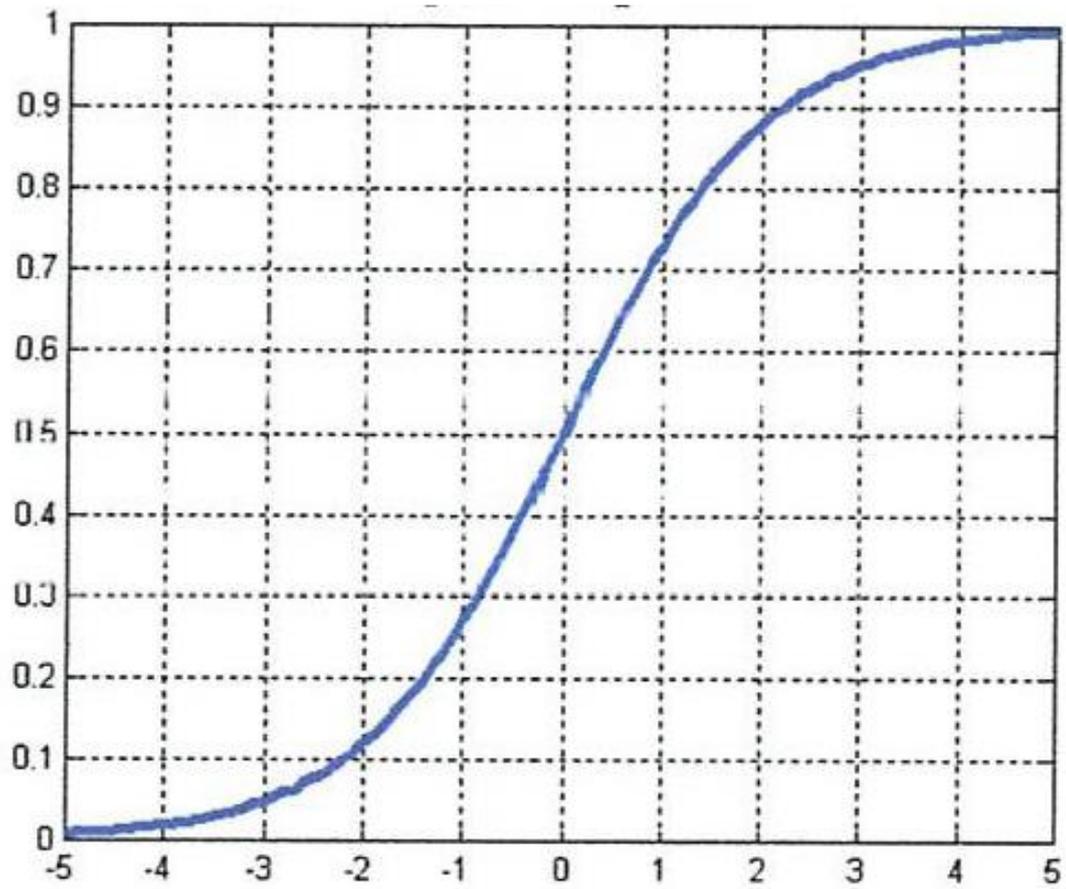


Figure II.7 : fonction sigmoïde unipolaire

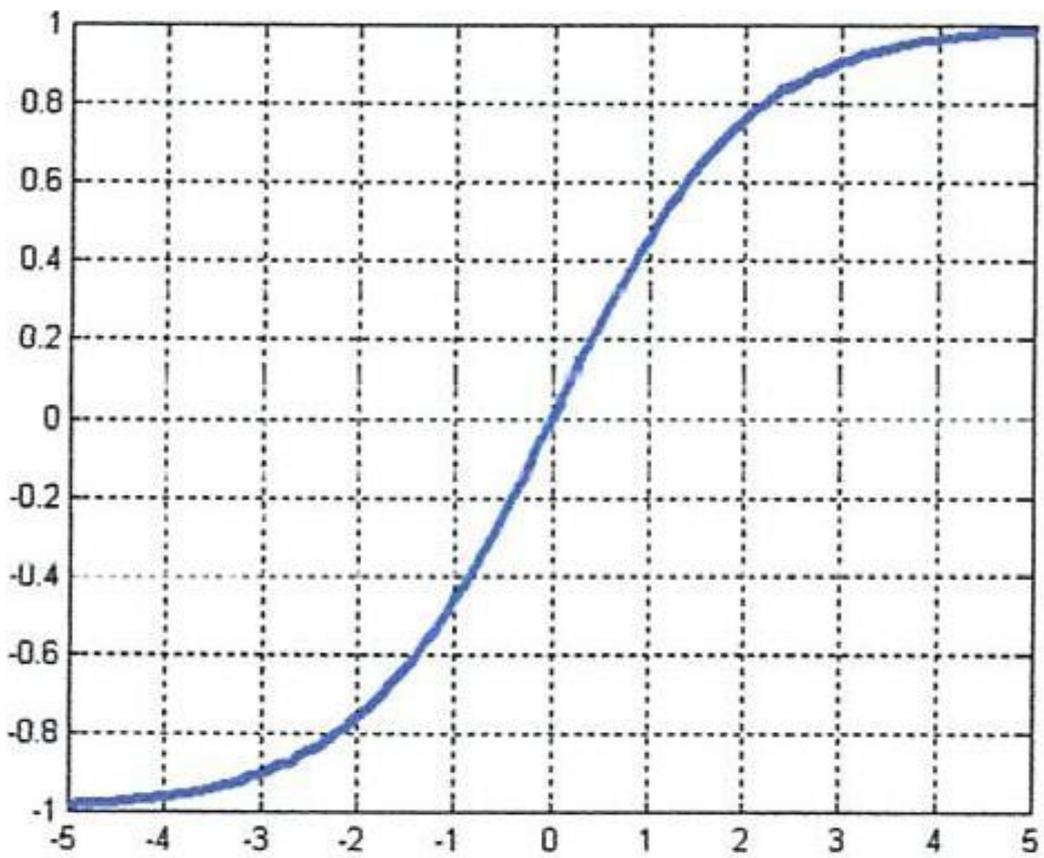


Figure II.8 : fonction sigmoïde bipolaire

Un neurone formel ne réalise rien d'autre qu'une somme pondérée suivie d'une 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.9.4. 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).

##### **- 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 (cinérite 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 connexionnisme ».

#### **II.10. Perceptron multicouches (PMC):**

La Figure II.9 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.

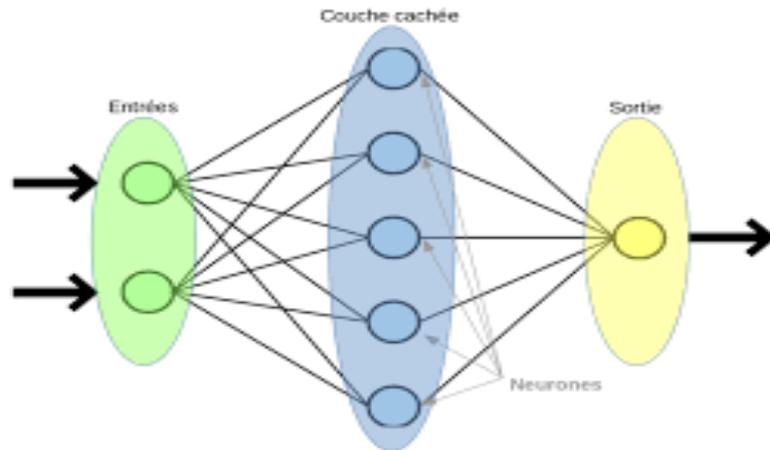


Figure II.9 : perceptron multicouche a une couche cachée

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.11. Propriétés des Réseaux de Neurones Formels:

Les propriétés essentielles des réseaux de neurones sont:

#### - 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.

#### - 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.

#### - 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.12. 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.12. 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.

#### **- 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.13. 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.14.Choix de l'architecture:

Tableau II. 5 : 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 feed-forward 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- Rétro propager 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, époques.)

Où: W: vecteur des poids synaptiques

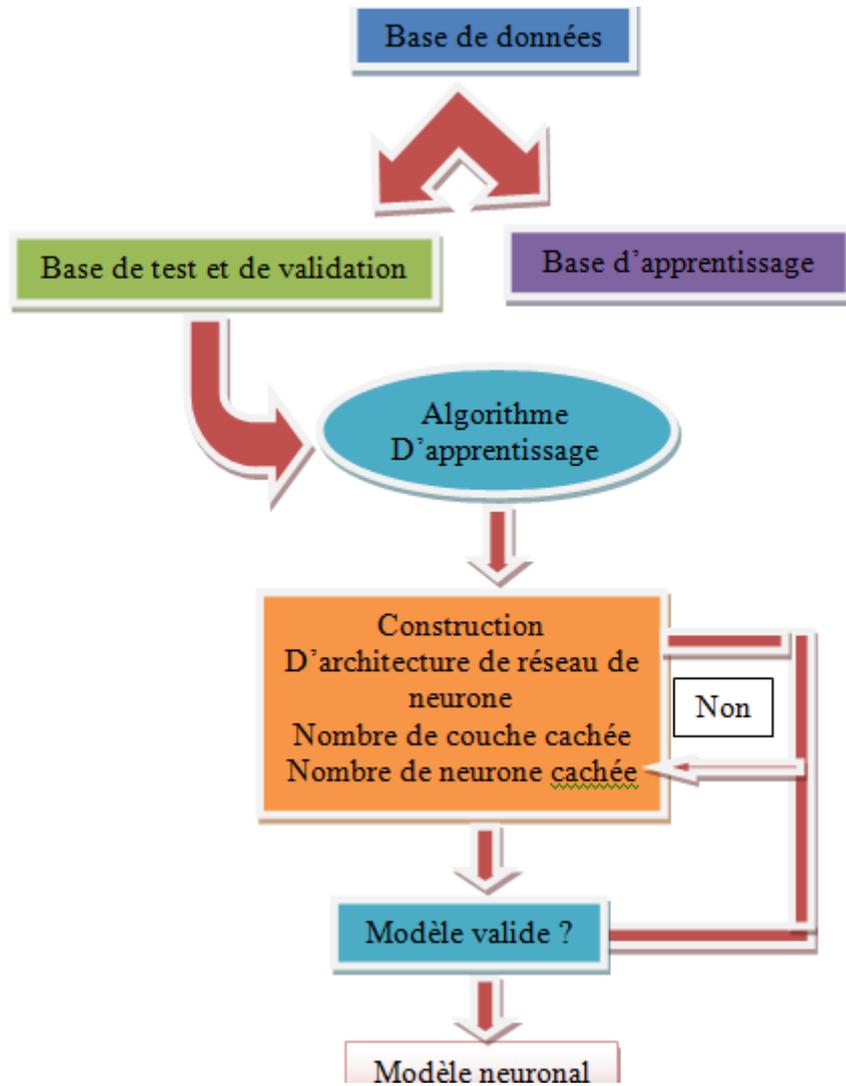


Figure II.10 : organigramme de conception d'un réseau de neurones

# Chapitre III

## Prédiction des tensions seuils dans les mélanges

$SF_6-N_2$

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

Dans le dernier chapitre nous avons appliqué technique des réseaux neurones en exploitant des données expérimentales réalisées au sein du laboratoire LEMD/CNRS Grenoble, France par le **professeur Lemzadmi Ahcène**

### **III.2.Implémentation et simulation :**

Pour la prédiction de la tension de seuils nous avons utilisé le logiciel de calcul Matlab dans sa version 20015a. Pour établir notre réseau nous avons besoin d'une banque de données, celle-ci peut être exportée directement à partir d'un fichier excel. Après avoir exporté la banque de données, nous introduirons la commande « nntool » dans la fenêtre de commande, une interface graphique apparaît, elle nous permet de créer un réseau, le visualiser, l'entraîner, le simuler, et exporter les valeurs de sortie. La simulation du notre RNA est effectuée en utilisant l'interface graphique « Neural Network Tool (nntool) » disponible sur Matlab.

#### **III.2.1. Création des données :**

Avant de créer un réseau, il faut d'abord introduire les entrées qui sont dans notre cas la pression les taux du mélange SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> dans le mélange et les tensions de seuils qui doivent être atteinte par le réseau. Pour cela on clique sur import, une interface graphique apparaît , elle nous permet d'introduire les entrées (input) et les valeur qui doivent être atteinte par le réseau.

#### **III.2.2. Méthodes d'apprentissage :**

L'utilitaire nntool sous MATLAB contient plusieurs variantes de l'algorithme de Rétro-propagation du gradient de l'erreur, la variante la plus intéressante étant l'algorithme de Levenberg-Marquardt communément appelé «faster-propagation». Cet algorithme sera utilisé dans notre application RNA. Cet algorithme appartient aux algorithmes d'apprentissage par paquets (hors-ligne, off-line, batch mode) où les poids sont modifiés après le passage de tous les exemples. Il est dénommé dans MATLAB par Trainlm (apprentissage par l'algorithme LevenbergMarquardt).

#### **III.2.3. Application du RNA :**

L'utilisation de notre système de RNA consiste en plusieurs étapes qui peuvent êtres résumées comme suit :

### III.2.4.1. Modèle de réseau de neurone :

Un réseau de type propagation vers l'avant « FEED-FORWARD » est choisi. Les paramètres utilisés dans le modèle RNA sont montrés dans le tableau III.1. Il est à noter, que nous disposons de deux bases de données différentes l'une est utilisée pour l'apprentissage du RNA, d'entrée (densité de gaz, Pression) et sorties (Vs tension de seuil) correspondantes et l'autre formée de utilisée pour tester le RNA pour la prédiction de la tension de contournement (voir le tableau).

Tableau III.1. Paramètre finaux de la structure et d'apprentissage de RNA

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

### III.2.4.2. Résultat du nombre des neurones cachés et des couches cachées :

Nous avons choisi les paramètres de l'apprentissage de telle sorte que l'apprentissage s'arrête dans deux cas, soit le nombre d'itérations (epochs) est achevé, soit l'erreur (goal) est atteinte. La figure. donne la fenêtre d'apprentissage pour le test effectué (nombre d'itération =5000, nombre de couche cachée=10 et nombre de neurone par couche cachée =2). Après avoir procédé à l'apprentissage. L'ensemble de la base de données totale (entrées et sorties) sera dévié aléatoirement comme suit: (75%) pour l'apprentissage, (15%) pour tests et (10%) validation.

- La première, pour faire l'apprentissage et validation dans le but de vérifier la capacité de généralisation du réseau.
- La deuxième, de test et sert à évaluer les performances finales du réseau. Paramètres de la structure et de l'apprentissage Nombre d'entrées 2 Nombre de sortie 1 Algorithme d'apprentissage Levenberg-Marquardt (TRAINLM) Fonction d'ajustement des poids et

seuils LEARNGDM Fonction de Performance Erreur quadratique moyenne (MSE)  
 Fonctions de Transfert Fonction de transfert sigmoïde (LOGSIG) pour les couches  
 cachées. Fonction de transfert linéaire (PURELIN) pour la couche de sortie.

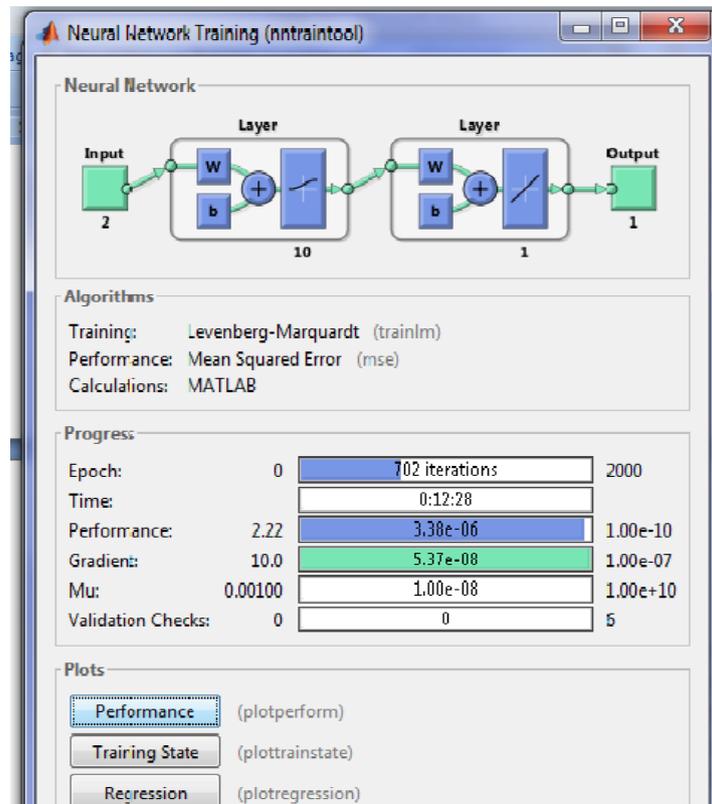


Figure III.2 : Fenêtre de l'apprentissage de l'outil " nntool" dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 2 neurones par couche

### III.2.4.3. Création du RNA en utilisant l'interface graphique de l'utilitaire nntool :

La figure III.3. Présente la structure du RNA (RP) dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée et 2 neurones par couche pour chercher le meilleur nombre de couches cachées et neurones par couche. L'organigramme présenté par la figure III.3, présente la démarche pour déterminer le nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couche. La figure. donne l'interface nntool utilisé pour introduire les paramètres du RNA donnés par le tableau est à noter que le nombre des neurones par couche et le nombre de

couches cachées utilisés dans notre travail est celui obtenu .

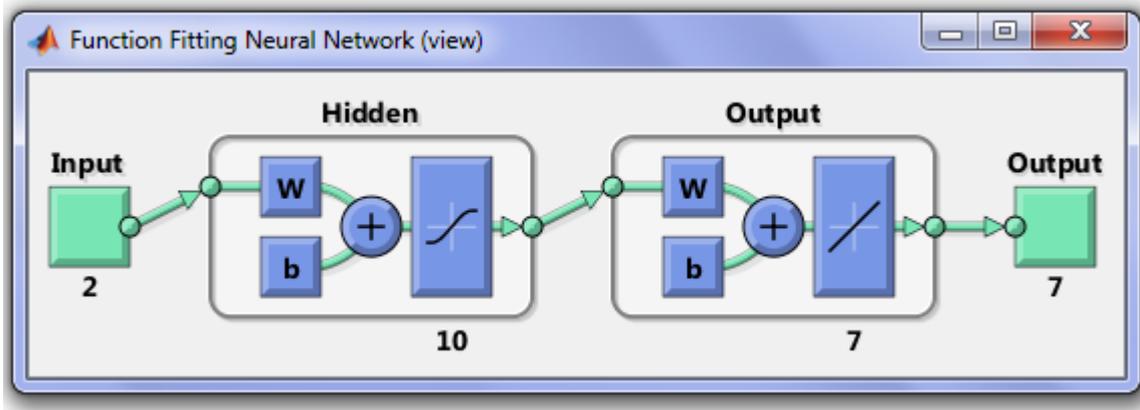


Figure III.3 : Structure de RNA dans le cas d'utilisation 10 couches cachées et 2 neurones par couche.

#### III.2.4.4. Performance du réseau :

Les ordonnées de chaque courbe de la figure III.4, représentent les sorties du réseau (valeurs de "V" calculées) pour les entrées réservées à l'apprentissage, aux entrées réservées à la validation et aux entrées réservées au test.

Les droites tracées en continue de chaque courbe de la figure III.4 représentent la régression (fitting) de la relation qui relie les sorties calculées par RNA à celles désirées (valeurs de "V" choisies).

Les droites tracées en pointillée représentent l'approximation (régression) de référence voulue (parfaite) (sorties désirées = sorties calculées). Lorsque ces deux droites se confondent presque, ou se confondent totalement, nous parlons alors, d'une meilleure performance.

La valeur de "R" représente le rapport entre les sorties du réseau calculées et les cibles. Si  $R=1$ , ceci implique que les sorties calculées (output) sont égales aux cibles (Target) .

Dans ce cas, les droites tracées en pointillé (régression parfaite) et en continue (régression calculée) se coïncident totalement et une performance parfaite est obtenue. Alors, nous pouvons dire, qu'un meilleur apprentissage donne des valeurs de R très proche de 1.

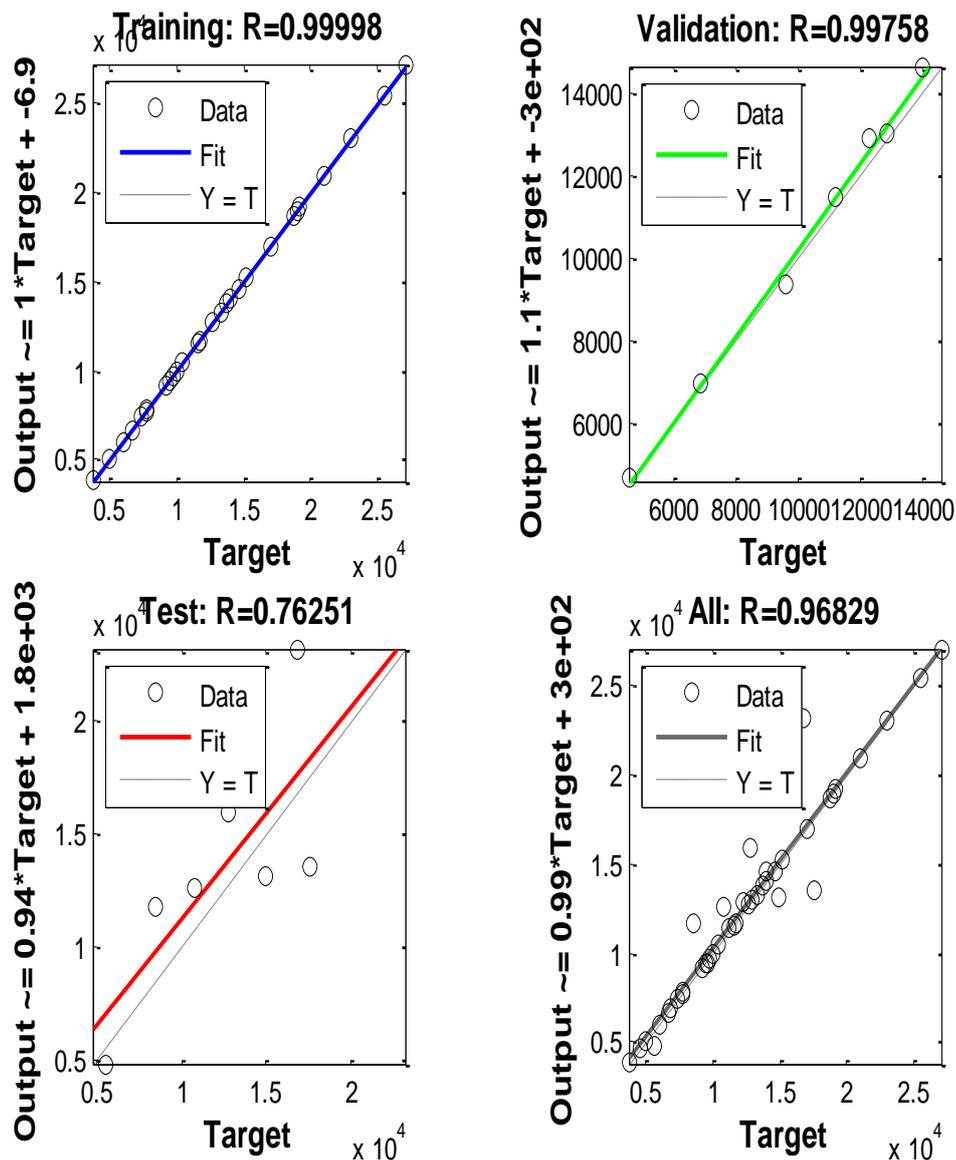


Figure III.4 : courbes de régression

Les courbes des tensions seuils mesurées et prédites en utilisant les réseaux Neurones ANN pour des mélanges de SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> et à des pressions variables et pour des taux de 10% SF<sub>6</sub> et 100% SF<sub>6</sub> en polarité négative sont présentées sur la figure III.5.

On peut constater avec l'augmentation du pourcentage du SF<sub>6</sub> dans le mélange les tensions seuils augmentent considérablement. Ceux-ci, est dû essentiellement à l'augmentation de l'électronégativité du mélange. Ainsi un faible taux du SF<sub>6</sub> peut améliorer la rigidité du mélange. La simulation donne des valeurs très proches entre les données expérimentales et les valeurs prédites par le modèle ANN.

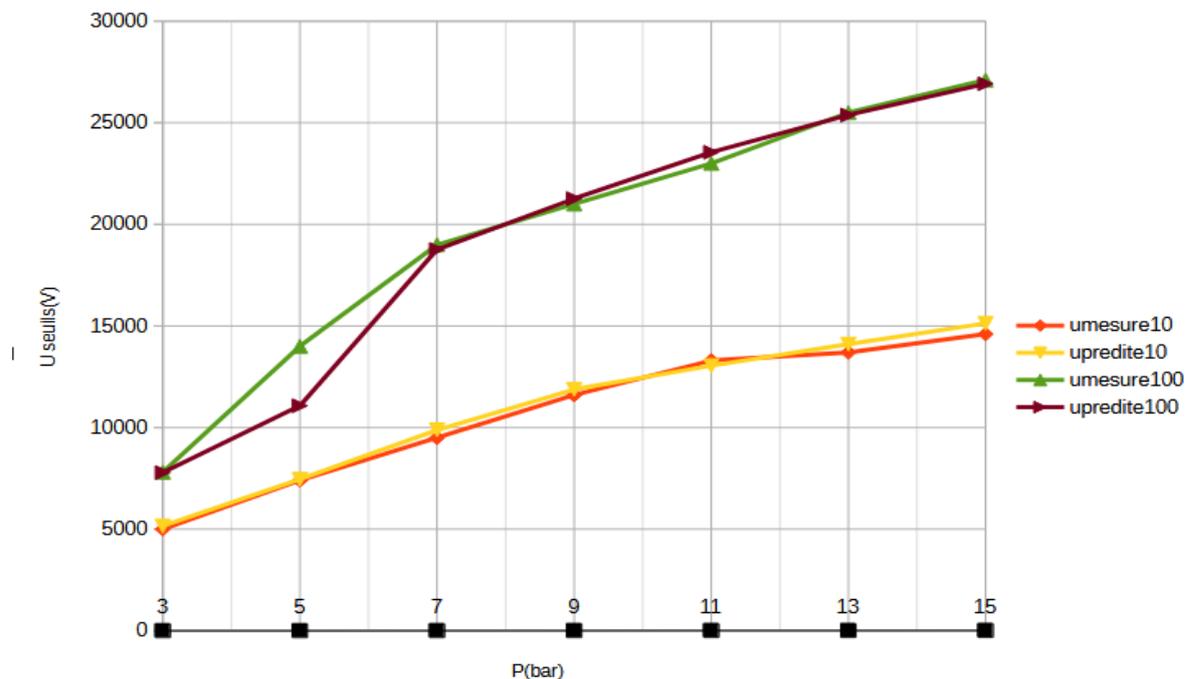


Figure III.5 : Courbes des tensions seuils mesurées et prédites à des pressions variables en polarité négative, pour des taux de 10% SF<sub>6</sub> et 100% SF<sub>6</sub>.

Les résultats de prédiction des tensions seuils en fonction du taux de SF<sub>6</sub> dans le mélange pour les pressions 5 bars et 10 bars en polarité négative sont présentés dans le figure III.6.

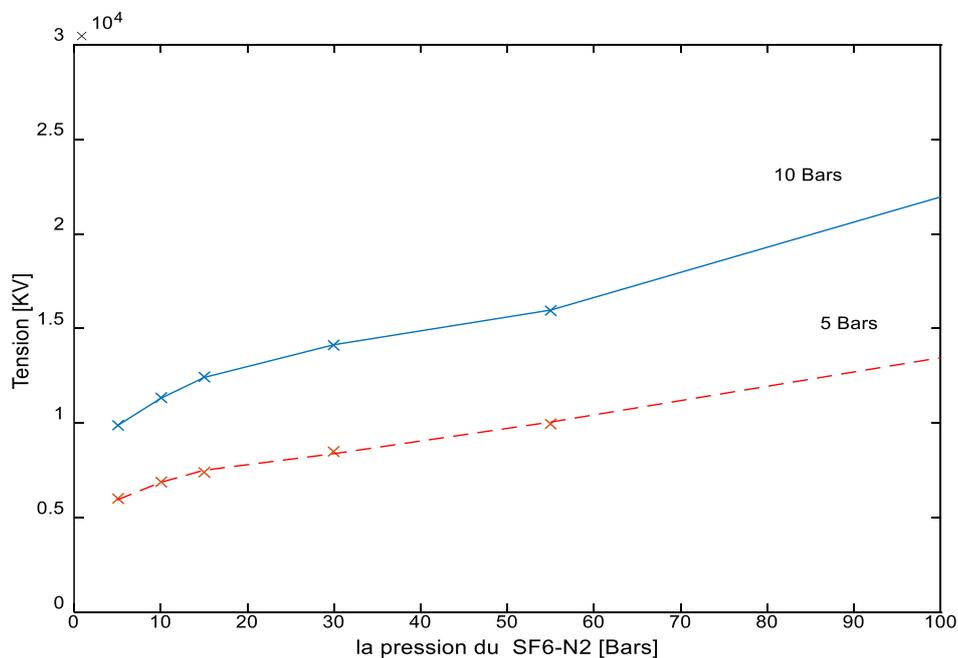


Figure III.6 : Tensions seuils prédites par ANN pour des mélanges de SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> et à des pressions non couvertes par l'expérimentation

Sur la figure III.6, la comparaison entre les valeurs prédites par les réseaux de neurones et celles mesurées expérimentalement sont en parfait accord.

Nous remarquons aussi que le (RNA) a pu prédire les tensions de seuils en fonction de taux de  $SF_6-N_2$  pour les valeurs qui ne sont pas utilisé pour l'entraînement du (RNA)

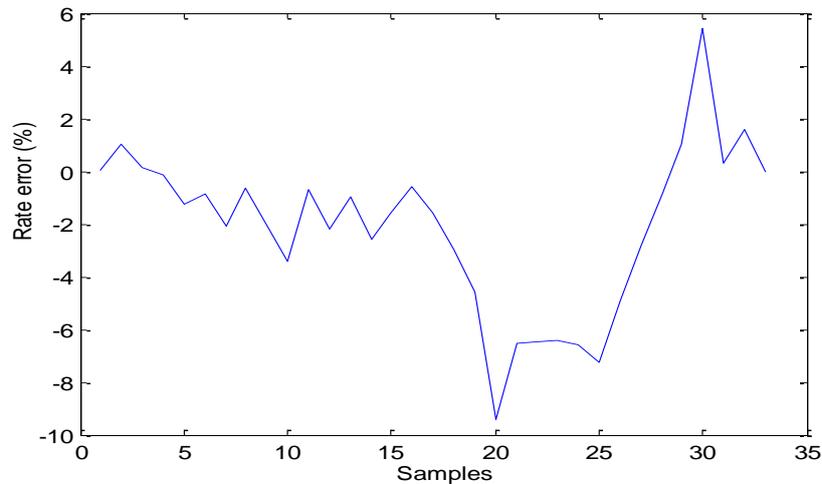


Figure III.7 : Evolution de l'erreur de prédiction

Selon la courbe d'évolution de l'erreur de prédiction donnée dans la figure, la variance est sensiblement égale à sa valeur maximale en valeur absolue est de l'ordre de à 10 %.

### III.3. Conclusion :

Les résultats obtenus montre que cette méthode d'intelligence artificielle qui est le réseau de neurone (RNA) pour la prédiction de la tension de seuils dans un mélange gazeux  $SF_6-N_2$  en haute tension à des pressions élevées soumis à de champs fortement divergent a été appliquée avec succès. Il y a un bon accord entre les résultats calculés et les résultats expérimentaux.

## Conclusion générale

Le présent travail a été consacré aux différents types d'isolants électriques. Leurs différentes propriétés, et caractéristiques ont été largement étalées. Une attention particulière est donnée aux décharges couronnes dans les gaz et spécialement les mélanges SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>. Les données expérimentales ont été fournies au niveau du laboratoire LGEG et utilisés pour la simulation en utilisant les techniques des réseaux neurones artificiels ANN.

Les résultats de prédiction des tensions seuils obtenus par les réseaux de neurones artificiels ANN montrent un bon accord avec ceux mesurés expérimentalement et calculés par les modèles empiriques

Les modèles de réseaux de neurones sont développés rapidement en utilisant uniquement des données réelles et montrent une meilleure précision que les autres techniques de modélisation empirique. Cette technique peut être un outil de modélisation de prédiction très utile pour les ingénieurs haute tension.

Cette méthode permet d'élargir les prédictions des tensions seuils au-delà des valeurs mesurées. A titre d'exemple on peut prédire des tensions seuils pour des taux et des pressions sans avoir les résultats expérimentaux

## Références bibliographique

### Chapitre I :

- [1-01]:Fares Sadi ,”matériaux diélectriques et applications industrielles”. support de cours l’université A.MIRA de Bejaia . 2020
- [1-02]:C.Menguy, “Techniques de l’ingénieur, traite génie électrique”.
- [1-03] :A.Boubakeur,”claquage des diélectriques liquides ‘’, support de cours l’université de Batna, 2002/2003.
- [1-04] : [http://edoc.bib.ucl.ac.be:61/ETD-db/collection/available/FUNDpetd-02232005-200950/unrestricted/05\\_chap1.pdf](http://edoc.bib.ucl.ac.be:61/ETD-db/collection/available/FUNDpetd-02232005-200950/unrestricted/05_chap1.pdf)
- [1-05] :”mémoire Etude des décharge électrique dans les gaz isolant”.
- [1-06] :N.Mohamed ,”Haute tension ,claquage des isolants”.
- [1-07] : <https://chatgpt.com/c/6819691a-6654-8007-a8bf-0d227eaa31fc>

### Chapitre II :

- [II-01] :H.Moisson et P.Lebeau,comp .Rev.13,pp.865,1900.
- [II-02] :H.G.Pollak et F.S.Cooper,Physical revue 56,pp.170-175,1939.
- [II-03] :KALI-CHIMIE, notice d’information sur les déférents gazes.
- [II-04] :F.Y.Chu. “SF6 Decomposition in Gas-insulated Equipment”,IEEE.
- [II-05] :A.Lamzadmi et M.Nemamcha,”Mise au point les déférents travaux en vue du remplacement du SF6”.
- [II-06] : FaussetL., Fundamentals of Neural Networks. Architecture - Algorithms and Applications, 1st Edition, Printice Hall, Inc., 1994.
- [II-07] : 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-08] : Rosenblatt F., The Perceptron: a Perceiving and Recognizing Automaton, Project PARA, Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Lab., 1957
- [II-09] : Widrow B. and Hoff M., Adaptive switching circuits, WESCON Convention Record, New York: IRE, Vol. 4, 1960, pp.96-104.
- [II-10] : MinskyM., et Papert S., Perceptrons, MIT Press, Cambridge, MA, 1969.
- [II-11] : 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-12] : Wa J. K., Neural Networks and Simulation Methods, Ist Edition, Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [II-13] : 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-14] : Ackley D., Hinton G. and Sejnowski T., A learning algorithm for Boltzmann machines Cognitive Science, Vol. 9, 1985, pp. 147-169.
- [II-15] : 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-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. 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-18]: <https://www.ritter.de/fr/fiches-techniques/liquide-demballage-calrix/#solubilite-des-gaz-coefficient-de-bunsen-a-temperature-ambiante>.
- [II-19]: <https://seniadz.net/index.php/hexafluorure-de-soufre-sf6-proprietes-applications-industrielles-et-defis-environnementaux/>
- [II-20]:[https://cellpack-powersystems.com/fr/elimination-de-sf6#:~:text=L'hexafluorure%20de%20soufre%20est,de%20son%20cycle%20de%20vie](https://cellpack-powersystems.com/fr/elimination-de-sf6#:~:text=L%27hexafluorure%20de%20soufre%20est,de%20son%20cycle%20de%20vie).
- [II-21] : O. Farish, O. E. Ibrahim and A. Kurimoto, 3th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.31.15, Milan 1979.
- [II-22]: Nitta and Shibuya, "Electrical Breakdown of Long Gaps in Sulphur-Hexafluoride", IEEE. Trans. on PAS, Vol. PAS-90, N°3, pp. 1065-1071, 1971.
- [II-23]:[https://cellpack-powersystems.com/fr/elimination-de-sf6#:~:text=L'hexafluorure%20de%20soufre%20est,de%20son%20cycle%20de%20vie](https://cellpack-powersystems.com/fr/elimination-de-sf6#:~:text=L%27hexafluorure%20de%20soufre%20est,de%20son%20cycle%20de%20vie).
- [II-24] : L.G Christophorou, J.K Olthoff and R.J. Van Brunt, "Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry", IEEE Elec. Insul. Magazine, Vol.13, N°5, 1997.

### **Chapitre III :**

La recherche de Mme gerroui assia