

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

**Faculté de technologie**

**Département D'Electromécanique**

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme

**DE DOCTORAT EN SCIENCES**

**Etude et simulation de l'écoulement  
des charges électriques dans les  
matériaux isolants.**

**Option :**

**Electromécanique**

**Présenté par :**

**KASRI Souad**

**DIRECTEUR DE THESE : Mr. HEROUS Lazhar Professeur (U. Annaba)**

**Soutenu le :17/12/2024 devant le jury composé de :**

|                        |            |              |           |
|------------------------|------------|--------------|-----------|
| Mr Benretem Abdelwahab | Professeur | U. Annaba    | Président |
| Mr Rachedi Faouzi      | Professeur | U. Annaba    | Examineur |
| Mr Ghemari Zine        | Professeur | U. M'Sila    | Examineur |
| Mr Zahzouh Zoubir      | MCA        | U. Souk Hras | Examineur |
| Mr Khoualdia Tarek     | MCA        | U. Souk Hras | Examineur |

# ملخص

---

تلعب المواد العازلة، وخاصة البولي إيثيلين تيريفثاليت (PET)، دورًا رئيسيًا في العديد من الأنظمة الكهربائية بفضل خصائصها العازلة. ومع ذلك، فإن هذه المواد تخضع لعدة ضغوط كهربائية وبيئية تؤدي إلى ظواهر معقدة، مثل تطور الشحنات الكهربائية على سطحها، مما قد يؤثر على أدائها. دراسة هذه الظواهر تُعد تحديًا رئيسيًا لضمان موثوقية المواد العازلة.

لقد حاول العديد من الباحثين في السابق تطوير نماذج للتنبؤ بتدهور الجهد السطحي (DPS) لهذه المواد، لكن النماذج التي تم تطويرها لم تكن دقيقة بما فيه الكفاية بسبب تعقيد العمليات المتعددة المؤثرة. في دراستنا، استخدمنا قياسات الجهد السطحي كطريقة رئيسية لتحليل سلوك البولي إيثيلين تيريفثاليت.

لتحقيق أقصى استفادة من هذه التحليلات، تم استخدام طريقة خطط التجارب لتكوين قاعدة بيانات قوية وفعالة وتقليل عدد التجارب المطلوبة. نظرًا لصعوبة نمذجة تطور الشحنات باستخدام الطرق التقليدية، لجأنا إلى الذكاء الاصطناعي، وخاصة الخوارزميات التطورية مثل الخوارزميات الجينية والخوارزميات التطورية التفاضلية. بفضل هذا النهج، تمكنا من تطوير نموذج رياضي دقيق وقادر على التنبؤ بتدهور الجهد السطحي بدقة عالية.

**الكلمات المفتاحية:** المواد العازلة، البولي إيثيلين تيريفثاليت (PET)، تدهور الجهد السطحي (DPS)، طريقة خطط التجارب، الذكاء الاصطناعي، الخوارزميات التطورية، الخوارزميات الجينية، الخوارزميات التطورية التفاضلية.

# Résumé

---

Les polymères, et en particulier les polyéthylène téréphtalates (PET), jouent un rôle central dans divers systèmes électriques grâce à leurs propriétés isolantes. Cependant, ces matériaux sont soumis à des contraintes électriques et environnementales qui engendrent des phénomènes complexes, tels que l'évolution des charges électriques à leur surface, compromettant leur performance. L'étude de ces phénomènes reste un défi majeur pour garantir la fiabilité des matériaux isolants.

De nombreuses recherches ont tenté de modéliser avec précision le déclin du potentiel de surface (DPS) des isolants. Toutefois, les modèles développés jusqu'à présent manquaient de fiabilité en raison de la nature complexe et multifactorielle du processus. Pour surmonter ces limitations, notre étude a utilisé les mesures de potentiel de surface comme méthode clé pour analyser le comportement des polyéthylène téréphtalates.

Pour optimiser ces analyses, la méthode des plans d'expérience a été employée, permettant de construire une base de données robuste et de minimiser les essais expérimentaux. L'évolution des charges électriques étant difficile à modéliser avec les méthodes classiques, nous avons fait appel à l'intelligence artificielle, notamment aux algorithmes évolutionnaires tels que les algorithmes génétiques et à l'évolution différentielle. Grâce à cette approche, nous avons développé un modèle mathématique novateur et fiable, capable de prédire le DPS avec une grande précision.

**Mots clés :** Les polymères, polyéthylène téréphtalates (PET), matériaux isolants, déclin du potentiel de surface (DPS), la méthode des plans d'expérience, l'intelligence artificielle, les algorithmes évolutionnaires, les algorithmes génétiques, les algorithmes à évolution différentielle

# Abstract

---

Polymeric materials, particularly polyethylene terephthalates (PET), play a crucial role in various electrical systems due to their insulating properties. However, these materials are subject to electrical and environmental stresses that lead to complex phenomena, such as the evolution of electrical charges on their surface, which can compromise their performance. Studying these phenomena remains a major challenge for ensuring the reliability of insulating materials.

Many researchers have previously attempted to develop models to predict the surface potential decay (SPD) of these materials, but the models developed so far have lacked reliability due to the complex, multifactorial nature of the process. In this study, we used surface potential measurements as a key method to analyze the behavior of polyethylene terephthalates.

To optimize these analyses, the design of experiments method was employed to build a robust database and minimize the number of experimental trials. Given the difficulty in modeling charge evolution with traditional methods, we turned to artificial intelligence, specifically evolutionary algorithms such as genetic algorithms and differential evolution algorithms. Through this approach, we were able to develop an accurate mathematical model capable of predicting SPD with high precision.

**Keywords :** Polymeric materials, polyethylene terephthalates (PET), insulating materials, the surface potential decay (SPD), the design of experiments method, artificial intelligence, evolutionary algorithms, genetic algorithms, differential evolution algorithms.

# Remerciement

---

*Mes premières pensées se dirigent tout naturellement vers mon directeur de thèse Lazhar HEROUS pour le formidable encadrement qu'il m'a accordé tout au long de ce travail. Je ne peux que le remercier, non seulement pour ses compétences scientifiques, mais aussi pour ses qualités humaines et pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée. Je remercie sincèrement Mr MT KIMOUR, professeur à l'université de badji mokhtar annaba de m'avoir vivement conseillé cette thèse au cours de ma recherche sous sa propre direction, ainsi pour nos fructueuses discussions et son implication dans mes travaux.*

*Mes remerciements et ma profonde gratitude vont également aux membres du jury. Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers Monsieur BENRETEM Abdelwahab, Professeur à l'Université d'Annaba, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de présider mon jury de soutenance. Mes remerciements vont également à Monsieur RACHEDI Faouzi, Professeur à l'Université d'Annaba, Monsieur GHEMARI Zine, Professeur à l'Université de M'Sila, Monsieur ZAHZOUH Zoubir, Maître de conférences class 'A', à l'Université de Souk Hras, Monsieur KHOUALDLA Tarek, Maître de conférences class 'A', à l'Université de Souk Hras, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de participer à ma soutenance en tant qu'examineurs.*

*Pour finir, je tiens à remercier tous les membres de ma famille pour leurs soutiens, leurs encouragements et leurs patiences durant toute la durée qu'a pris cette thèse. Aussi, je remercie toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, m'a aidé dans l'élaboration de ce travail.*

# Dédicace

---

*A ma famille*

# Table Des Matières

|   |           |
|---|-----------|
| Liste des figures.....  | 11        |
| Liste des tableaux.....   | 14        |
| Liste des symboles.....   | 15        |
| Introduction générale .....                                     | 17        |
| <b>I. Etat De L'art</b>   |           |
| <b>I.1. Introduction.....</b>                                   | <b>21</b> |
| <b>I.2. Définition.....</b>                                     | <b>21</b> |
| <b>I.3. Structures moléculaires des polymères solides .....</b> | <b>23</b> |
| I.3.1. Structure amorphe.....                                   | 23        |
| I.3.2. Structure cristalline.....                               | 23        |
| I.3.3. Structure semi cristalline .....                         | 23        |
| <b>I.4. Techniques de polymérisation.....</b>                   | <b>25</b> |
| I.4.1. Polymérisation en masse .....                            | 25        |
| I.4.2. Polymérisation en solution.....                          | 25        |
| I.4.3. Polymérisation en suspension .....                       | 25        |
| I.4.4. Polymérisation en émulsion.....                          | 25        |
| I.4.5. Polymérisation en phase gazeuse .....                    | 26        |
| <b>I.5. Matériau étudié .....</b>                               | <b>26</b> |
| I.5.1. Caractéristiques générales du PET .....                  | 26        |
| I.5.1.1. Généralité sur le PET.....                             | 27        |
| I.5.1.2. Structure amorphe du PET .....                         | 28        |
| I.5.1.3. Structure du PET semi-cristalline.....                 | 30        |
| I.5.1.4. Dégradation du PET .....                               | 32        |
| <b>I.6. Vieillessement des polymères.....</b>                   | <b>34</b> |
| I.6.2. Hydrolyse des polymères .....                            | 35        |
| I.6.2.1. Détérioration des propriétés diélectriques .....       | 36        |
| I.6.2.2. Détérioration des propriétés mécaniques.....           | 37        |
| I.6.3. Erosion sous l'effet des décharges surfaciques .....     | 38        |
| I.6.3.1. Mécanismes de dégradation conventionnels .....         | 39        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I.7. Différentes techniques de chargement des polymères .....</b> | <b>42</b> |
| I.7.1. Charge par effet triboélectrique .....                        | 42        |
| I.7.2. Charge par rouleau électrostatique .....                      | 43        |
| I.7.3. Charge par décharge couronne.....                             | 43        |
| I.7.3.1. Quelques propriétés des décharges couronnes .....           | 44        |
| <b>I.8. Phénomènes physiques dans le processus de déclin .....</b>   | <b>48</b> |
| I.8.1. Conduction de surface.....                                    | 48        |
| I.8.2. Polarisation de l'échantillon.....                            | 48        |
| I.8.3. Neutralisation par le gaz.....                                | 49        |
| I.8.4. Phénomènes piézoélectriques.....                              | 49        |
| I.8.5. Injection de charges .....                                    | 50        |
| <b>I.9. Conclusion.....</b>  | <b>50</b> |
| <b>II. Théorie Sur Les Phénomènes D'évolution Du DPS</b>             |           |
| <b>II.1. Introduction .....</b>                                      | <b>52</b> |
| <b>II.2. Théorie sur les phénomènes d'évolution du DPS .....</b>     | <b>53</b> |
| <b>II.3. La polarisation .....</b>                                   | <b>56</b> |
| <b>II.4. La polarisation et le déclin de potentiel.....</b>          | <b>57</b> |
| II.4.1. La fonction réponse diélectrique .....                       | 58        |
| II.4.2. Déclin de potentiel par polarisation diélectrique .....      | 59        |
| II.4.3. Polarisation par charge d'espace.....                        | 60        |
| <b>II.5. Conductions dans les isolants .....</b>                     | <b>60</b> |
| <b>II.6. Mécanismes d'injection de charges dans l'isolant .....</b>  | <b>63</b> |
| II.6.1. Effet Schottky .....   | 64        |
| II.6.2. Effet Fowler – Nordheim .....                                | 64        |
| <b>II.7. Conduction en volume .....</b>                              | <b>65</b> |
| II.7.1. Considérations générales (isolant homogène) .....            | 65        |
| <b>II.8. Mesure par sonde à condensateur vibrant .....</b>           | <b>69</b> |
| <b>II.9. Conclusion .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>III . Algorithmes Evolutionnaires</b>                             |           |
| <b>III.1. Introduction.....</b>                                      | <b>75</b> |
| <b>III.2. Les Algorithmes Génétiques.....</b>                        | <b>76</b> |
| <b>III.3. Définitions de base des algorithmes génétiques .....</b>   | <b>77</b> |
| <b>III.4. Les opérateurs des algorithmes génétiques .....</b>        | <b>78</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| III. 4.1. Population initiale .....                                     | 79        |
| III.4.2. Le codage .....  | 80        |
| III.4.2.1. Codage binaire.....  | 80        |
| III.4.2.2. Codage réel .....  | 80        |
| III.4.3. L'évaluation.....  | 81        |
| III.4.4. La Sélection.....  | 81        |
| III.4.4.1. Sélection par roulette (RWS : Roulette Wheel Selection)..... | 81        |
| III.4.4.2. Sélection par Tournoi.....                                   | 82        |
| III.4.4.3. Sélection par Stochastic Universal Sampling (SUS) .....      | 83        |
| III.4.4.4. Méthode de Sélection par Rang.....                           | 83        |
| III.4.5. Le croisement ou crossover.....                                | 83        |
| III.4.5.1. Croisement en un point .....                                 | 84        |
| III.4.5.2. Croisement en deux points.....                               | 84        |
| III.4.5.3. Croisement uniforme .....                                    | 84        |
| III.4.6. Mutation .....   | 85        |
| <b>III.5. Paramètres d'un AG .....</b>                                  | <b>85</b> |
| <b>III.6. Les algorithmes à évolution différentielle .....</b>          | <b>86</b> |
| III.6.1. Principe de l'algorithme DE.....                               | 86        |
| III.6.2. Stratégie .....  | 86        |
| III.6.2.1. Mutation.....  | 87        |
| III.6.2.2. Croisement.....  | 87        |
| III.6.2.3. Sélection .....  | 88        |
| III.6.2.4 Critère d'arrêt.....  | 89        |
| III.6.3. Procédure .....  | 89        |
| III.6.4. Avantages et limites de l'évolution différentielle .....       | 90        |
| III.6.4.1. Avantages de l'évolution différentielle .....                | 90        |
| III.6.4.2. Limites de l'évolution différentielle .....                  | 90        |
| <b>III.7. Conclusion.....</b>   | <b>90</b> |
| <b>IV. Modélisation Expérimentale Du Déclin De Potentiel En Surface</b> |           |
| <b>IV.1. Introduction .....</b>   | <b>93</b> |
| <b>IV.2. Technique de DPS et matériau .....</b>                         | <b>94</b> |
| <b>IV.3. Modélisation mathématique .....</b>                            | <b>96</b> |
| <b>IV.4. Modèle d'étude .....</b>                                       | <b>96</b> |
| <b>IV.5. Mise en œuvre de l'algorithme génétique.....</b>               | <b>97</b> |
| IV.5.1. Codage proposé.....   | 98        |

|   |            |
|---|------------|
| IV.5.2. Fonction objectif.....  | 99         |
| IV.5.3. Opérateurs génétiques utilisé.....                                  | 100        |
| <b>IV.6. Résultats de la modélisation .....</b>                             | <b>100</b> |
| <b>IV.7. L'évolution différentielle .....</b>                               | <b>105</b> |
| <b>IV.8. Mise en œuvre de l'algorithme à évolution différentielle .....</b> | <b>107</b> |
| IV.8.1. Initialisation.....   | 108        |
| IV.8.2. Évaluation .....  | 108        |
| IV.8.3. Mutation et Recombinaison .....                                     | 108        |
| <b>IV.9. Amélioration de l'algorithme ED.....</b>                           | <b>109</b> |
| <b>IV.10. Evaluation .....</b>  | <b>110</b> |
| <b>IV.11. Résultats .....</b>   | <b>111</b> |
| <b>IV.12. Validation .....</b>  | <b>114</b> |
| <b>IV.13. Conclusion.....</b>   | <b>116</b> |
| <b>Conclusion Générale .....</b>  | <b>117</b> |
| <b>Perspectives .....</b>   | <b>119</b> |
| <b>Bibliographies.....</b>  | <b>120</b> |

# Table Des Figures

---

Figure I.1. Représentation schématique d'une unité morphologique sphérolitique dans le Polyéthylène.

Figure I.2. Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate.

Figure I.3. Réaction d'estérification entre l'acide téréphtalique et l'éthylène glycol.

Figure I.4. Réaction de transestérification entre le diméthyle téréphtalate et l'éthylène glycol.

Figure I.5. Evolution de l'architecture du PET au cours d'un essai de traction uniaxial (a) Phase nématique, (b) phase smectique et (c) phase triclinique.

Figure I.6. Diffractogramme d'un PET semi-cristallin non orienté indiquant les indices de Miller des plans diffractant.

Figure I.7 : Configuration (a) de la molécule et (b) de la maille élémentaire triclinique du PET semi-cristallin.

Figure I.8. Schéma de la structure lamellaire d'un polymère semi-cristallin.

Figure I.9. Dégradation hydrolytique du PET.

Figure I.10. Mécanismes possibles expliquant la formation d'un réseau aromatique au cours de la dégradation thermique du PET.

Figure I.11. Phénomène d'osmose dans un composite polyester insaturé.

Figure I.12. Photographie de l'échantillon époxyde avec des électrodes moulées.

Figure I.13. Le graphique illustre l'évolution des paramètres.

Figure I.14. Etude de la contrainte à la rupture du PET en fonction du temps de vieillissement (chargé à 30% en fibres de verre).

Figure I.15. Processus physico-chimiques de l'érosion des polymères sous l'effet des décharges partielles.

Figure I.16. Dégradation du polymère après érosion sous l'effet des décharges partielles.

Figure I.17. Dispositif de charge par effet triboélectrique.

Figure I.18. Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique.

Figure I.19. Les différentes configurations dans le cas d'une décharge couronne.

Figure I.20. Schéma d'un éclat de décharge (Burst) montrant la charge d'espace positive se construit au voisinage de la cathode et comment la photo-ionisation permet l'étalement radial de la charge d'espace.

Figure I.21. Différents régimes de décharges couronnes en fonction de la tension. Cette dernière augmente quand on va de gauche à droite.

Figure I.22. Description de la décharge couronne négative.

Figure I.23. Conduction de surface.

Figure I.24. Polarisation de l'échantillon.

Figure I.25. Neutralisation par le gaz.

Figure I.26. Phénomène piézoélectrique.

Figure I.27. Injection de charges.

Figure II.1. Déclins de potentiels de surface pour des échantillons de polyéthylène illustrant l'effet du « crossover».

Figure II.2. Courbes de DPS obtenues pour plusieurs valeurs de tension de décharge positive.

Figure II.3 : Déclin du potentiel de surface pour différentes valeurs de température.

Figure.II.4 : Représentation schématique de trois types de polarisation:(a) électronique (b) atomique (c) d'orientation.

Figure II.5 : Evolution de la polarisation molaire en fonction de la fréquence du champ appliqué.

Figure II.6 : Diagramme de bande d'énergie. A gauche du diagramme, une représentation de la distribution de Fermi-Dirac indiquant la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie en fonction de la température.

Figure II.7 : Diagramme de la bande d'énergie des matériaux dans les trois situations ; (a) un isolant, (b) un semi-conducteur et (c) un conducteur.

Figure II.8 : Classification des mécanismes de conduction dans un matériau diélectrique.

Figure II.9 : Allures des courants d'absorption et de résorption.

Figure II.10 : Matériau isolant avec des charges mobiles et soumis à un champ électrique.

Figure II.11 : Modèle élémentaire du déclin de potentiel (RC).

Figure II.12 : Comparaison du modèle RC avec des données expérimentales échantillon  $e = 1$  mm ; RH = 50% ;  $T^\circ = 60^\circ\text{C}$  ;  $V = -1800\text{V}$

Figure II.13 : Défauts d'ordre topologique.

Figure II.14 : Principe de modulation par variation de capacité.

Figure II.15 : Principe de mesure du potentiel de surface à l'aide de la sonde à condensateur vibrant.

Figure II.16 : Relevés graphiques des taux prédits du déclin de potentiel en surface à court terme D500s **(a)** et à long terme D3000s **(b)** en fonction de : potentiel initial  $V_0$  , Température  $\theta$  et l'Humidité Relative HR.

Figure II.17 : Iso-contours des taux prédits du déclin de potentiel de surface à long terme D3000s, en fonction de la Température  $\theta$  et l'Humidité Relative HR].

Figure.II.18 : Analyse comparative de la prédiction du DPS par le réseau optimal dans la phase du test.

Figure III.1. Schéma de principe d'un Algorithme Génétique.

Figure III.2. Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique.

Figure III.3. Illustration schématique du codage des variables réelles.

Figure III.4. Exemple de roulette artificielle.

Figure III.5. Représentation schématique du croisement en un point.

Figure III.6. Représentation schématique du croisement en deux points.

Figure III.7. Représentation schématique de la mutation.

Figure III.8. Mutation différentielle.

Figure III.9. Croisement différentiel : binomial à gauche, exponentiel à droite.

Figure IV.1. Codage d'une solution.

Figure IV.2. Taux du DPS prédit par l'AG en fonction de la température  $\theta$  et l'humidité relative  $RH$  : (a) ( $D_{500s}$ ) et (b) ( $D_{3000s}$ ).

Figure IV.3. Réponses prédites à courte durée ( $D_{500s}$ ) par AG en fonction des facteurs : ( $V_0$ ,  $\theta$  et  $RH$ ).

Figure IV.4. Réponses prédites à longue durée ( $D_{3000s}$ ) par AG en fonction des facteurs: ( $V_0$ ,  $\theta$  et  $RH$ ).

Figure IV.5. Etapes de l'algorithme ED.

Figure IV.6. Flux de traitement de la méthode ED.

Figure IV.7. Evolution de la valeur de  $f_{obj}$  en fonction de nombre de générations (( $D_{3000s}$ ) et ( $D_{500s}$ )).

Figure IV.8. Taux du DPS prédit par ED en fonction de la température  $\theta$  et l'humidité relative  $RH$ : (( $D_{500s}$ ) et ( $D_{3000s}$ )).

Figure IV.9. Réponses prédites ( $D_{500s}$ ) par ED en fonction des facteurs :  $V_0$ ,  $\theta$  et  $RH$ .

Figure IV.10. Réponses prédites ( $D_{3000s}$ ) par ED en fonction des facteurs :  $V_0$ ,  $\theta$  et  $RH$ .

Figure IV.11. Evolution de la valeur de  $f_{obj}$  en fonction du nombre de générations ( $D_{500s}$ ) et ( $D_{3000s}$ ) obtenu par GA.

# Liste Des Tableaux

---

Tableau I.1. Structures chimiques de polymères courants.

Tableau III.1. Exemple de croisement uniforme

Tableau IV.1: Protocole d'essais expérimentaux.

Tableau.IV.2. Paramètres de l'algorithme génétique

Tableau IV.3. Coefficients des modèles polynomiaux

Tableau. IV.4 : Paramètres de l'algorithme ED

Tableau IV.5 : Résultats de validation des modèles mathématiques avec DE

Tableau IV.6: Résultats de validation des modèles mathématiques avec GA

# Liste Des Symboles

---

**DPS** : Déclin de Potentiel de Surface.

**PET** : polyéthylène téréphtalate.

**AG** : Algorithme Génétique.

**DE** : Algorithme à Evolution.

**T** : Température.

**RH** : Humidité relative.

**V<sub>0</sub>**: potentiel initial.

**PE** : polyéthylène.

**PTFE** : polytétrafluoroéthylène.

**PP** : Polypropylène.

**PC** : Polycarbonate.

**TA** : l'acide téréphtalique.

**EG** : l'éthylène glycol.

**T<sub>g</sub>** : La température de transition vitreuse.

**AC** : tensions alternatives.

**μ** : la mobilité des ions.

**E** : l'amplitude du champ électrique.

**$\vec{P}$**  : la polarisation.

**ε** : La permittivité relative.

**ε<sub>0</sub>** : permittivité du vide.

**$\vec{E}_l$**  : champ local.

**α** : polarisabilité globale.

**α<sub>e</sub>**: polarisabilité électronique.

**α<sub>i</sub>**: polarisabilité ionique.

**α<sub>0</sub>**: polarisabilité orientation.

**e**: épaisseur.

**k<sub>B</sub>** : la constante de Boltzmann.

**E<sub>f</sub>** : le niveau d'énergie de Fermi.

**β<sub>s</sub>**: la constante de Schottky.

**E<sub>c</sub>**: le champ électrique réel à la cathode.

**q** : la charge élémentaire  $\approx 1.602 \cdot 10^{-19}$  C.

**h** : la constante de Planck  $\approx 6.626 \cdot 10^{-34}$  J.s.

$\text{pop}_m$  : la masse effective de l'électron.  
 $\mathbf{J}_v$  : la densité du courant volumique ( $\text{Am}^{-2}$ ).  
 $\rho_v$  : la résistivité volumique ( $\Omega\text{-m}$ ).  
 $\delta_s$  : la densité superficielle de charges ( $\text{c-m}^{-2}$ )  
 $\mathbf{R}$  : la résistance.  
 $\sigma_v$  : la conductivité volumique.  
 $\tau$  : la constante de temps.  
 $V_s$  : le potentiel de surface.  
 $C_0$  : la capacité moyenne.  
 $C_1$  : l'amplitude des variations.  
**SUS** : la sélection par Stochastic Universal Sampling.  
**RWS** : Roulette Wheel Selection.  
 $P_c$  : la probabilité de croisement.  
 $N$  : la taille de la population.  
 $P_m$  : la probabilité de mutation.  
 $F_{obj}$  : la fonction objectif.  
 $\mathbf{X}_{best}(t)$  : le meilleur individu dans la population à la génération  $t$ .  
 $rand$  : une valeur aléatoire entre  $[0,1]$ .  
 $CR$  : le taux de croisement.  
 $K$  : le coefficient de combinaison.  
 $V_t$  : Le potentiel mesuré à l'instant  $t$ .  
 $y$  : est la grandeur de sortie mesurée expérimentalement.  
 $a_0$  : La valeur prédite.  
 $a_i$  : L'effet de facteur  $x_i$ .  
 $a_{ij}$  : L'interaction entre  $x_i$  et  $x_j$ .  
 $a_{ijk}$  : L'interaction entre  $x_i, x_j, x_k$ .  
 $N$  : Le nombre de bits codant un coefficient.  
 $g_{io}$  : Représente le gène qui code le bit de signe.  
 $N_e$  : le nombre des essais expérimentaux.  
 $y_j$  : la réponse prédite par le modèle.  
 $y_{mes}$  : la réponse mesurée.  
 $N_{pop}$  : La taille de la population.  
 $V_{i,t}$  : le vecteur mutant.  
 $U$  : le vecteur d'essai.

# Introduction Générale

---

L'avènement des technologies miniaturisées à l'échelle des minis, micro et nanotechnologies maintient l'électrotechnique comme l'un des domaines scientifiques primordiaux. En fait, la plupart des technologies actuelles et futures utilisées dans notre société reposent sur l'énergie électrique. Le bon fonctionnement des structures électromécaniques, en fonction de n'importe quelles conditions aux limites auxquelles ils sont exposés, peut donc être considéré comme un domaine d'investigation particulièrement important [1]. À travers leur interprétation la plus vaste, les matériaux sont considérés comme la base fondamentale dans le domaine du progrès des dispositifs électriques. La diversité des matériaux diélectriques tant en caractéristiques qu'en nature posent un problème important pour les utilisateurs et la réalisation des systèmes électriques ainsi que lors de la conception par polymérisation. La compréhension de la cinétique des charges statiques déposées par décharge couronne à partir d'une avalanche électronique sur la surface du polymère constitue l'intérêt principal de nos recherches actuelles.

Malgré les multiples avantages offerts par l'usage de ces isolants pour toutes les installations électromécaniques, ces isolateurs ont des défaillances pour de nombreuses contraintes, électriques, mécaniques ou autres [2,3]. De nombreux travaux ont été menés dans les laboratoires de recherche pour améliorer leur fiabilité. Le but de cette investigation et l'objectif de cette recherche est de comprendre les dysfonctionnements en tenant compte des problèmes d'exploitation, tout en cherchant à parfaire les grandeurs de fonctionnement.

L'importance de la fonction d'isolation réside dans son intégration parmi les exigences fondamentales pour une meilleure protection des installations électriques dans tous les domaines impliqués dans l'alimentation en électricité et en domaine de la haute tension. Depuis plusieurs décennies, le progrès dans la recherche sur le vieillissement électrique ont connu une évolution notable [4]. La durée de fonctionnement des isolants polymères sous haute tension est généralement évaluée à environ 30 ans, ce qui signifie que la majorité des systèmes de transmission mis en place dans les années 1970 se rapprochent de la fin de leur période d'efficacité opérationnelle [5]. Les enjeux revêtent une grande importance, et l'objet de cette thèse est de démystifier les phénomènes associés à la détérioration sous l'influence de champs électriques, et ce préventivement avant même que le polymère ne montre une altération et de dégradations susceptibles de compromettre rapidement la fiabilité du système en cas d'incident [6].

Les sondes électrostatiques destinées pour la mesure sans contact ont connu grand développement [7]. Cela englobe la surveillance des variations de la cinétique des charges statiques, les performances des photocopieurs et l'évaluation du potentiel de rétroaction.

Estimer la réduction du potentiel de surface suite à l'accumulation de charges est une méthode efficace, pratique et très pertinente pour analyser les propriétés électriques des matériaux isolants, en particulier des polymères [8]. Cette estimation du potentiel vise à enrichir l'explication des différents phénomènes de la cinétique des charges et à améliorer ces caractéristiques pour d'autres utilisations. L'objectif principal de cette approche est d'éviter tout contact avec des surfaces chargées, dont le potentiel de surface est évalué à l'aide d'une sonde vibrante [9].

Ce document expose les conclusions d'une recherche entreprise dans le but d'examiner la circulation d'ions négatifs au sein d'un film de polyéthylène téréphtalate (PET) d'une épaisseur de 0,5 mm. Cette étude a pris en considération le potentiel initial ( $V_0$ ), la température ( $\theta$ ) ainsi que le taux d'humidité (RH). L'originalité de cette investigation est l'usage d'algorithmes évolutionnaires (Algorithme Génétique (GA) et Algorithme de l'Evolution Différentielle (DE)) pour modéliser ce phénomène. L'objectif principal consiste à identifier la solution optimale en réduisant au minimum la fonction objectif à l'aide de ces algorithmes. Notre objectif est de développer de nouvelles approches inspirées des principes biologiques qui valident les contraintes temporelles et minimisent la fonction d'erreur, car la méthode expérimentale demande beaucoup de travail et beaucoup de temps.

Les réalisations accomplies ont mis en lumière notre engagement à mesurer les impacts des variables ( $V_0$ ,  $\theta$  et HR) ainsi que leurs interactions au moyen d'approches évolutionnaires basées sur des algorithmes. Cela a été accompli en étudiant l'évolution à court et à long terme du taux de décroissance du potentiel de surface. Cette technique était particulièrement intéressante et nous a donné lieu à formuler un modèle mathématique pour exprimer la quantité de la charge neutralisée dans les isolants. Il est également prouvé que le taux de décroissance du potentiel de surface est étroitement lié de ces facteurs. De plus, Il a été démontré que ce taux de diminution dépend fortement de ces éléments. Les conclusions obtenues révèlent un schéma d'évolution des charges en corrélation avec ces différents facteurs, et confirment que les algorithmes évolutifs constituent une approche appropriée pour étudier les éléments qui expliquent le mécanisme du DPS. Pour atteindre notre objectif, nous avons formulé notre thèse comme suit :

- Le chapitre 1 présente l'état de l'art sur les polymères, en abordant leurs structures et les différentes techniques de polymérisation utilisées pour leur fabrication. Il traite également des

phénomènes liés au vieillissement des polymères, en mettant l'accent sur les effets physiques tels que l'hydrolyse et l'érosion causée par les décharges surfaciques. Enfin, ce chapitre explore les mécanismes de chargement des polymères et les phénomènes de conduction et de polarisation, essentiels pour comprendre leur déclin sous tension.

- Le chapitre 2 aborde la théorie des phénomènes liés à l'évolution du déclin de potentiel de surface (DPS). Ce chapitre explore plusieurs processus fondamentaux, notamment la polarisation et le déclin de potentiel par polarisation électrique, ainsi que la fonction de réponse électrique. Nous discuterons également des mécanismes de polarisation par charge d'espace, de conduction dans les isolants, et de l'injection de charge dans ces matériaux. Enfin, nous examinerons les différents types de conduction, tout en présentant les méthodes de mesure associées, telles que la sonde à condensateur vibrant.
- Le troisième chapitre expose les algorithmes évolutionnaires comme une méthode d'optimisation récente, soulignant leur utilité pour mesurer les impacts des divers facteurs et leurs interactions dans ce contexte.
- Dans le quatrième chapitre, des résultats issus d'une étude utilisant la méthodologie des algorithmes évolutionnaires, tels que l'évolution différentielle et génétique, sont présentés. Cette recherche examine les effets des facteurs tels que la température, l'humidité relative et la tension initiale sur la diminution de déclin de potentiel de surface d'un polyéthylène téréphtalate (PET).

Enfin, le manuscrit se termine par une synthèse générale qui met en lumière les points forts de l'étude et présente les perspectives futures découlant de ce travail.

# Chapitre I : Etat De L'art

## **I.1. Introduction**

Depuis les années 60, le développement industriel de la science des polymères a connu une très forte évolution. De nos jours, on rencontre plusieurs de polymères, leur utilisation s'étend dans un large éventail de domaines tels que la microélectronique, la médecine ou l'industrie aéronautique et spatiale [1].

Les matériaux polymères présentent un intérêt particulier car ils sont légers, faciles à fabriquer, recyclables, avec de bonnes caractéristiques électriques et mécaniques et peu coûteux par rapport à d'autres matériaux. De ce fait, ils sont considérablement répandus et exploités dans divers domaines [2]. Les isolants de synthèse sont souvent utilisés pour isoler les composantes électroniques, les différents moteurs, les câbles d'alimentation, les condensateurs de puissance, et bien d'autres.

La large gamme de polymères et leurs remarquables propriétés diélectriques, mécaniques et thermiques en font les matériaux les plus utilisés pour l'isolation moyenne et haute tension [3]. Grâce à cette évolution, nous avons réussi à augmenter la tension de fonctionnement de 15 kV/mm à 40 kV/mm, tout en réduisant les pertes par un facteur de trois.

Dans ce chapitre, une introduction générale sur les polymères sera fournie en premier lieu, suivie par la présentation de quelques notions relatives au matériau au cœur de cette thèse. Par la suite, une présentation des caractéristiques de la décharge corona, utilisée pour déposer des charges électrostatiques sur des isolants et des polymères, sera détaillée. Pour finir, le chapitre s'achèvera par un aperçu des phénomènes physiques impliqués dans le processus de DPS.

## **I.2. Définition**

Les polymères sont des substances constituées de plusieurs monomères sous forme de chaînes, que l'on désigne sous le nom de macromolécules. L'unité appelée monomère est répétée plusieurs fois [4]. Les structures moléculaires se forment par le biais d'une réaction chimique connue sous le nom de polymérisation. Les unités monomériques sont reliées fortement pour créer des chaînes moléculaires. Les propriétés des polymères dépendent de divers facteurs, comme la longueur de la chaîne, la structure chimique et le type de liaison chimique entre les atomes. On peut observer les polysaccharides naturels, ou similaires, réalisés par transformation chimique des isolants naturels. Les isolants sont également des matériaux synthétiques fabriqués en polymérisant des molécules monomères telles que le polystyrène et le polyisoprène synthétique.

On distingue deux procédés chimiques impliqués dans la synthèse des polymères :

-La polyaddition, employée, par exemple, dans la fabrication du polyéthylène, du polypropylène et du polystyrène.

-La polycondensation, ou polymérisation par étapes, est utilisée pour produire des polymères tels que le polyéthylène téréphtalate (PET).

Diverses unités de base de polymères et leurs abréviations normalisées en électrotechnique sont présentées dans le tableau I.1 [5].

Tableau I.1. Structures chimiques de polymères courants.

| <i>Polymère et abréviation</i>         | <i>Structure chimique</i>                    |
|--|--|
| <i>Polyéthylène (PE)</i>               | $\text{-(CH}_2\text{—CH}_2\text{)-}_n$       |
| <i>Polytétrafluoroéthylène (PTFE)</i>  | $\text{-(CF}_2\text{—CF}_2\text{)-}_n$       |
| <i>Polypropylène (PP)</i>              | $\text{-(CH}_2\text{—CH(CH}_3\text{))}_n$    |
| <i>Polyéthylène téréphtalate (PET)</i> |  |
| <i>Polyéthylène naphtalate (PEN)</i>   |  |
| <i>Polyamide 6 (PA 6), p=5</i>         | $\text{-(CH}_2\text{)}_p\text{-C(=O)-NH-}_n$ |
| <i>Polycarbonate (PC)</i>              |  |

On peut citer quelques étendues d'utilisations des polymères :

- Le polyéthylène (PE) pour l'isolation des câbles est étroitement exploité en raison de son faible coût.
- Il est également important de préciser que le polytétrafluoroéthylène (PTFE) est remarquable pour l'isolation, il peut aussi résister à des températures très élevées.

- Polypropylène (PP), une polyoléfine de type polyéthylène surtout employée dans les dispositifs électroniques.
- Par ailleurs, le PET et le PEN présentent une remarquable résistance thermique et sont aussi appliquée si dans les composantes électroniques.
- Polycarbonate (PC) est connu comme le plus remarquable des isolants transparents avec une excellente tenue en température.

### **I.3. Structures moléculaires des polymères solides**

L'organisation des atomes dans les polymères solides peut adopter un ordre ou un désordre, donnant ainsi lieu à divers types de structures :

#### **I.3.1. Structure amorphe**

La région désignée par le terme "amorphe" se distingue par un désordre étendu. À l'échelle submicronique, il n'y a aucune organisation régulière entre les macromolécules, ni cohérence dans leur arrangement ou orientation.

Lorsque les chaînes moléculaires dépassent une certaine taille, les macromolécules créées des zones d'entrelacement physique. Au-delà d'une certaine longueur des chaînes moléculaires, les macromolécules peuvent inévitablement former des points d'enchevêtrement physiques. Ce phénomène est très courant dans les polymères commerciaux. Les sections entre les zones d'entrelacement sont souvent suffisamment assez étendues pour que ces portions agissent comme des chaînes moléculaires individuelles. Si l'espace libre est régulièrement réparti dans tout le volume du matériau, les segments de chaîne peuvent générer un niveau de flexibilité. Il apparait un volume libre et permet au polymère de changer sa structure. En d'autres termes, ce qui joue un rôle crucial dans les propriétés physiques et mécaniques du polymère.

#### **I.3.2. Structure cristalline**

Une structure cristalline se caractérise par la répartition continue et alternée des particules constituant le matériau, formant un réseau cristallin avec un ordre à longue distance. Les matériaux métalliques ainsi que de nombreux matériaux céramiques possèdent une telle structure cristalline [6].

#### **I.3.3. Structure semi cristalline**

On peut adopter divers états intermédiaires entre les phases amorphe et cristalline. La cristallisation peut engendrer des structures supérieures de nature sphérolitique. Ces formations sont observables au microscope. L'image capturée révèle une configuration de pavage hexagonal,

qui peut être plus ou moins régulière. Cette caractéristique correspond à la présence d'unités structurales contiguës, prenant une forme approximativement polyédrique, et dénommées sphérolites.

La raison sous-jacente de la forme quasi-polyédrique des éléments de structure dans les polymères devient évidente lorsque l'on analyse le processus de leur création. À une échelle observable via la microscopie optique, on observe que chaque élément prend naissance à un point spécifique du matériau et se développe ensuite de manière essentiellement radiale (voir figure I.1). En conséquence, la limite entre deux sphérolites se forme là où la cristallisation se produit simultanément à partir des centres de développement voisins.

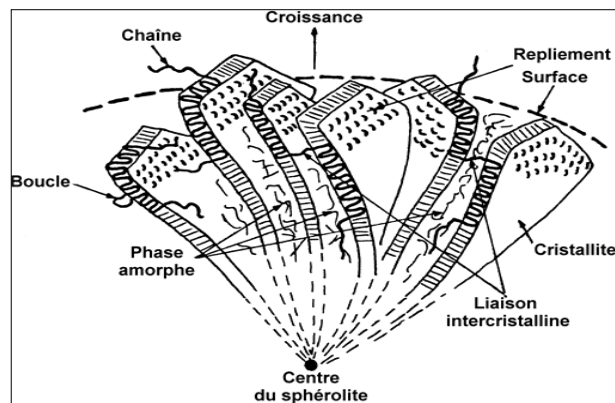


Figure I.1. Représentation schématique d'une unité morphologique sphérolitique dans le Polyéthylène.

Les sphérolites occupent pratiquement la totalité du volume du polymère solide, ce qui signifie que ce dernier n'est que partiellement cristallin.

Le développement de la région cristalline engendre une structure lamellaire similaire à celle observée dans les agencements de monocristaux. Cette superstructure de lamelles entraîne une rotation graduelle de la normale aux lamelles successives. Cette rotation, avec un espacement significatif, se manifeste par la configuration hautement distinctive de cercles concentriques qui peut être observée au microscope dans les sphérolites dotées de structures lamellaires [7].

La morphologie d'un polymère exerce indubitablement une influence substantielle sur ses propriétés physiques, notamment ses propriétés électriques. Cependant, les relations entre ces facteurs demeurent en grande partie mal comprises sur le plan quantitatif ou n'ont pas pu être formulées avec précision.

## **I.4. Techniques de polymérisation**

La production des isolants chimiques utilise généralement cinq procédés :

### **I.4.1. Polymérisation en masse**

Ce procédé est le plus simple car il n'emploie que des monomères et des amorceurs solubles dans les motifs chimiques. En règle générale ce procédé est réalisé à une grande température et une grande pression, et les polymères résultants présentent une meilleure qualité [8].

### **I.4.2. Polymérisation en solution**

Ce procédé ne peut être utilisé sans une substance de dissolution. Son rôle principal est de réguler la libération de chaleur pendant la réaction. Il est important de distinguer selon que le polymère et le catalyseur sont solubles ou non. Quoique les polymères résultants soient moins purs que ceux obtenus par polymérisation en masse, ce procédé est adopté principalement pour l'utilisation des polymères sous forme liquide, car la neutralisation des résidus est très onéreuse et compliquée [9].

### **I.4.3. Polymérisation en suspension**

Dans ce procédé, le polymère ne se dissout pas alors que le catalyseur est soluble uniquement dans le polymère. La goutte en suspension peut être vue comme un système de polymérisation en masse indépendant. Finalement, le polymère peut apparaître sous forme de billes, ou sous forme de billes [8].

### **I.4.4. Polymérisation en émulsion**

Dans ce procédé, la polymérisation se produit dans un environnement aqueux, mais par une technique distincte, dans un réacteur vertical fortement agité. Les catalyseurs hydrosolubles s'accumulent dans les micelles formées par un agent tensioactif. Les monomères sont ajoutés graduellement pour former des gouttelettes. En raison de sa faible solubilité, le monomère migre vers la "micelle" contenant le catalyseur, où il subit la polymérisation. Cela donne naissance à une émulsion de particules très fines, de l'ordre du micromètre, qui ne peut pas être filtrée. Cette émulsion est ensuite pulvérisée et séchée à l'aide d'un courant d'air chaud.

Ce procédé permet l'obtention des degrés de polymérisation élevés, surpassant ce qui est réalisable avec d'autres méthodes. À la fin de la réaction, le polymère adopte une forme d'émulsion stable composée de fines particules, prête à être utilisée telle quelle [10].

#### **I.4.5. Polymérisation en phase gazeuse**

Ce type de procédé nécessite des températures moyennes associées à des pressions et des volumes de catalyseurs faibles [11]. Il peut être assimilé au premier procédé cité [12]. Les molécules mères sont utilisées un état de vapeur via des catalyseurs solides finement divisés qui sont suffisamment efficaces à des concentrations si faibles pour éviter de l'extraire de l'isolant.

Dans ce procédé, le catalyseur est maintenu tout le temps, et le polymère est obtenu généralement après dégazage sous un aspect de poudre.

### **I.5. Matériau étudié**

Différentes investigations ont été effectuées sur le Polyéthylène téréphtalate, selon certains travaux, il est possible de réutiliser le PET après plusieurs utilisations, il suffit simplement de procéder à certains cycles de transformations. Malheureusement, cette ressource naturelle est surexploitée, son épuisement s'accélère aussi avec le temps. Différentes institutions de recherches ont axé leurs investigations sur les phénomènes d'altérations et la perte de leurs caractéristiques. Le but est de maîtriser le changement de la structure dans le temps pour améliorer ses caractéristiques.

#### **I.5.1. Caractéristiques générales du PET**

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polyester linéaire thermoplastique semi-aromatique, caractérisé par une structure interne complexe, ce qui confère au PET une vaste gamme de propriétés intéressantes. Il peut être amorphe, cristallin ou semi cristallin en fonction de la vitesse à laquelle il a été refroidi depuis l'état fondu. Il est connu par sa légèreté, sa résistance aux effets de l'environnement selon sa morphologie de base et particulièrement sa grande capacité de supporter les vibrations. Malgré l'effet de la contrainte thermique, il bénéficie tout de même d'une stabilité assez intéressante qui permet son utilisation dans divers domaines. Son utilisation s'explique aussi par son caractère réutilisable, sa solidité aux solvants et ses caractéristiques intéressantes.

On rencontre le PET dans différentes applications, initialement utilisé dans le domaine des fils et fibres. Il s'est par la suite élargi aux plastiques industriels tels que les bandes de convoyeurs, les pneus etc... Actuellement, on le trouve très souvent dans l'emballage grâce à sa facilité de mise en forme. Le polyéthylène téréphtalate (PET) présente des propriétés optiques telles que la transparence et l'opacité, variant en fonction de sa cristallinité et de son étirage. Selon le processus de cristallisation, le PET peut afficher des propriétés thermomécaniques solides tout en conservant sa transparence. Actuellement, ce matériau est largement employé en tant qu'isolant électrique que ce soit en basse, moyenne ou à haute tension.

### I.5.1.1. Généralité sur le PET

La conception structurale du PET est souvent considérée comme linéaire avec une molécule mère décrite sur la Figure I.2. L'existence d'un enchaînement de groupement solide dans la structure de base reflète l'importance de la stabilité structurale du polymère.

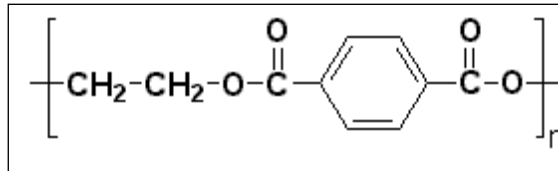


Figure I.2. Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate.

Le PET est conçu par différentes méthodes de synthèse. On peut citer [13] :

- La technique de la transestérification du plus simple composé chimique le glycol avec la formule  $C_6H_4(COOCH_3)_2$ .
- La technique par estérification avec un alcool double tels que l'éthylène glycol et d'acide dicarboxylique aromatique.

La pré-polyaddition et la polyaddition découlent de ces deux réactions.

#### I.5.1.1.1. Estérification

L'estérification est une réaction chimique entre l'acide téréphtalique (TA) et l'éthylène glycol (EG), où un acide carboxylique réagit avec un alcool pour former un ester, comme illustré à la figure I.3. À l'issue de cette réaction, qui dure environ 3 à 4 heures, l'eau en excès est éliminée. Cette réaction ne requiert pas de catalyseurs métalliques. Ce processus est fréquemment employé dans la fabrication de plastiques.

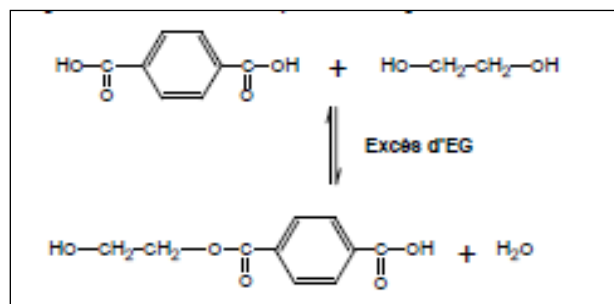


Figure I.3. Réaction d'estérification entre l'acide téréphtalique et l'éthylène glycol.

#### I.5.1.1.2. Transestérification

Si on détecte des réactifs (DMT et EG), on procède à un chauffage sous vide du mélange à une température comprise entre 160 et 180°C. Il est nécessaire d'incorporer un sel métallique en tant que catalyseur figure I.4. Si l'action entre EG et le DMT est situé entre 1,7 et 2, le catalyseur

est inactivé afin de contourner une accélération du vieillissement en fonction de la chaleur de l'isolant. Une fois que la réaction est terminée, l'excès d'EG et de méthanol est éliminé par chauffage.

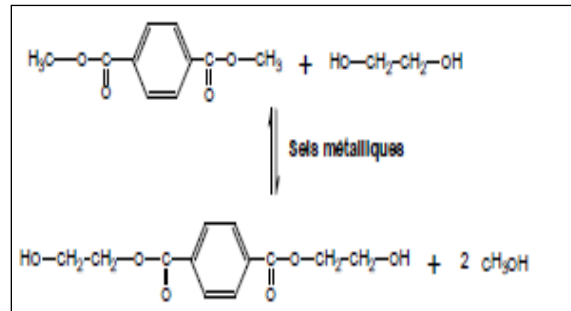


Figure I.4. Réaction de transestérification entre le diméthyle téréphtalate et l'éthylène glycol.

### I.5.1.1.3. Polycondensation à l'état solide

La polycondensation à l'état solide est un processus chimique dans lequel des polymères sont formés par la réaction de monomères en phase solide, généralement à des températures élevées. Contrairement à la polycondensation en phase liquide, cette méthode permet de réduire les pertes de solvant et de contrôler la structure du polymère. Elle est souvent utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux polymères. Lorsqu'ils sont sous la forme rigide la polycondensation offre l'avantage d'augmenter la masse molaire (viscosité) des polymères sans nécessiter de températures élevées, ce qui évite les attitudes secondaires de vieillissement en chaîne [14].

Une option supplémentaire pour accélérer la polycondensation des polymères consiste à les faire gonfler dans des solvants [15]. Cependant, il est important que le polymère ne se dissolve pas complètement. Le gonflement augmente la surface spécifique des flocons de PET, ce qui facilite leur contact avec les sites réactifs tels que les extrémités des chaînes d'acides carboxyliques.

### I.5.1.2. Structure amorphe du PET

Le PET amorphe se caractérise par une disposition désordonnée des chaînes polymériques, contrairement à la structure cristalline du PET cristallin [16]. En plus des chaînes de polymères sont constituées de liaisons covalentes entre les atomes de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, les interactions entre les chaînes, incluent des forces de Van der Waals et des liaisons hydrogène. La température de transition vitreuse ( $T_g$ ) du PET (polyéthylène téréphtalate) est généralement d'environ 70-80 °C. À cette température, le matériau passe d'un état rigide et vitreux à un état plus souple et flexible. Cette transition est cruciale pour déterminer les conditions d'utilisation et

de traitement du PET. [17]. Cette transition engendre une modification significative des propriétés physiques, en particulier des propriétés mécaniques, marquée par une chute importante du module élastique. À cette température, les segments des chaînes polymériques commencent à se déplacer de manière coordonnée, ce qui entraîne un passage d'un état rigide à un état plus souple et flexible. Cette coopérativité est essentielle pour la relaxation  $\alpha$ , où des groupes de molécules interagissent, permettant une certaine mobilité et influençant les propriétés mécaniques du matériau. [19]. La température de transition vitreuse ( $T_g$ ) est étroitement liée à la théorie du volume libre, qui propose que la mobilité des chaînes polymériques soit influencée par le volume libre disponible dans le matériau. La théorie du volume libre, étant la plus répandue.

Cette théorie, à l'échelle infiniment petite, aide à comprendre comment les propriétés mécaniques et thermiques des polymères changent en fonction de la température et de la structure moléculaire. [20]. Dans le cas du PET amorphe [21], une autre forme de relaxation, appelée relaxation  $\beta$ , se manifeste à une température inférieure à celle de la transition vitreuse. Cette relaxation est associée à des mouvements moléculaires locaux et suit la loi d'Arrhénius, caractérisée par une énergie d'activation significativement plus basse que celle de la relaxation  $\alpha$ .

L'analyse du comportement viscoélastique dynamique révèle que la relaxation  $\beta$  est un processus de relaxation rapide associé aux mouvements locaux des segments de chaînes polymériques [22].

- Tels que des mouvements de courtes distances, comme des rotations de groupes fonctionnels ou des vibrations locales au sein des chaînes.
- Mobilité des groupements carbonyles en conformation trans ( $\approx -70$  °C).

Les chaînes de polymères du PET amorphe adoptent deux conformations principales : trans (T) et gauche (G). La structure amorphe est effectivement caractérisée par un ordre à courte portée, où les chaînes polymériques peuvent avoir des arrangements relativement réguliers, tandis qu'à grande distance, il existe un désordre significatif, ce qui confère un caractère isotrope si le processus de mise en forme n'est pas affecté par le cisaillement ou les variations de température. Toutefois, après une mise en forme par étirage, on observe souvent une anisotropie qui confère aux chaînes une orientation préférentielle [23].

L'évolution de l'architecture macromoléculaire du PET amorphe permet alors d'obtenir une structure multi-phasée. D'après Dargent et al. [24], on peut observer deux structures amorphes différentes : Une structure amorphe irrégulière ou un agencement désordonné des chaînes polymériques, sans répétition régulière sur de grandes distances et une structure amorphe rigide ou un agencement désordonné de chaînes polymériques qui présente une certaine figure I.5.

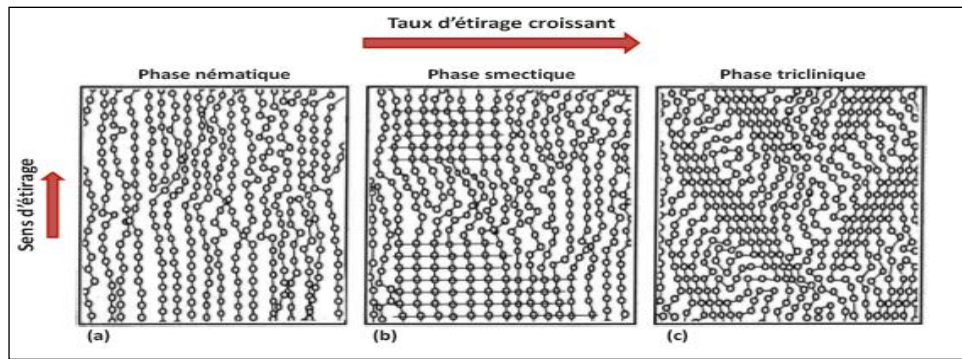


Figure I.5. Evolution de l'architecture du PET au cours d'un essai de traction uniaxial.  
 (a) Phase nématique, (b) phase smectique et (c) phase triclinique.

Les travaux de Bonart ont réussi à expliquer les transformations dans la structure interne du PET amorphe lors d'un essai de traction uniaxiale. Ces changements se caractérisent par la formation d'une phase nématique suivie d'une phase smectique [25]. La phase nématique est définie par Asano et al. [24] comme une structure de cristal liquide, lorsqu'une force est appliquée, les segments de chaînes se déplacent et s'alignent dans la direction de la charge. Lorsque la charge est prolongée, les phases smectiques peuvent se former où les chaînes s'organisent de manière à réduire l'énergie et à stabiliser la structure. [26]. Cette mésophase peut évoluer en une phase cristalline appelée phase triclinique. Cette orientation des chaînes contribue à améliorer les propriétés mécaniques et à influencer le comportement viscoélastique du matériau. [27].

Dans une étude sur la déformation d'un PET amorphe non orienté à une température supérieure à la transition vitreuse, Kawakami et al. [28] ont divisé l'évolution de la traction en trois zones. La première est marquée par le développement d'une mésophase induite par l'étirage. La deuxième partie montre une cristallisation évoluant à partir de la mésophase par nucléation et croissance, jusqu'à atteindre la troisième partie, caractérisée par le renforcement du matériau, où la structure cristalline du PET est réalisée et reste inchangée.

### I.5.1.3. Structure du PET semi-cristalline

Le PET présente la capacité de se cristalliser sous diverses structures cristallines, dépendant des conditions de mise en forme, telles que la température, la sollicitation mécanique ou le refroidissement. Il peut également connaître une cristallisation dans des situations stationnaires, que ce soit par un traitement thermique dépassant sa température de transition vitreuse, ou par un refroidissement progressif, suivie d'une isothermie à partir de l'état fondu. Par des variations de température, de concentration ou d'autres conditions favorables se développe une croissance de la structure cristalline (germination). Cela implique la création de petites régions ordonnées à l'échelle atomique ou moléculaire. Pour élucider les structures des matériaux, des biomolécules et

des composés organiques le procédé de la diffraction à rayon X est appliqué à de larges angles, en prenant en compte les intensités des pics du spectre [29] (voir Figure I.6). Le schéma de la maille cristalline du PET est illustré dans la figure 1.7, où Les pics observés dans le spectre de diffraction révèlent des informations sur l'organisation des chaînes polymériques. Les pics nets indiquent une structure cristalline, tandis que l'absence de pics ou des pics larges suggèrent une nature amorphe [30] et du changement mécanique ou thermique réalisé au polymère [31].

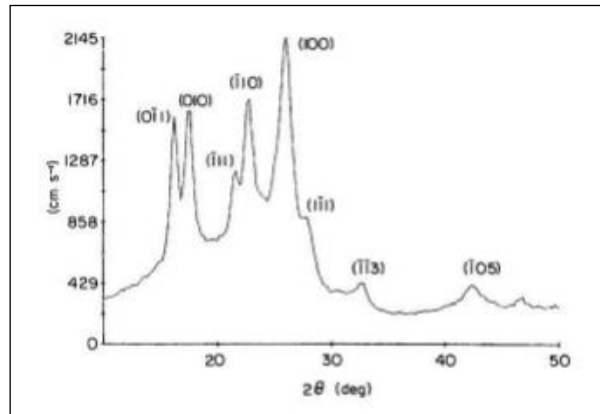


Figure I.6. Diffractogramme d'un PET semi-cristallin non orienté indiquant les indices de Miller des plans diffractant.

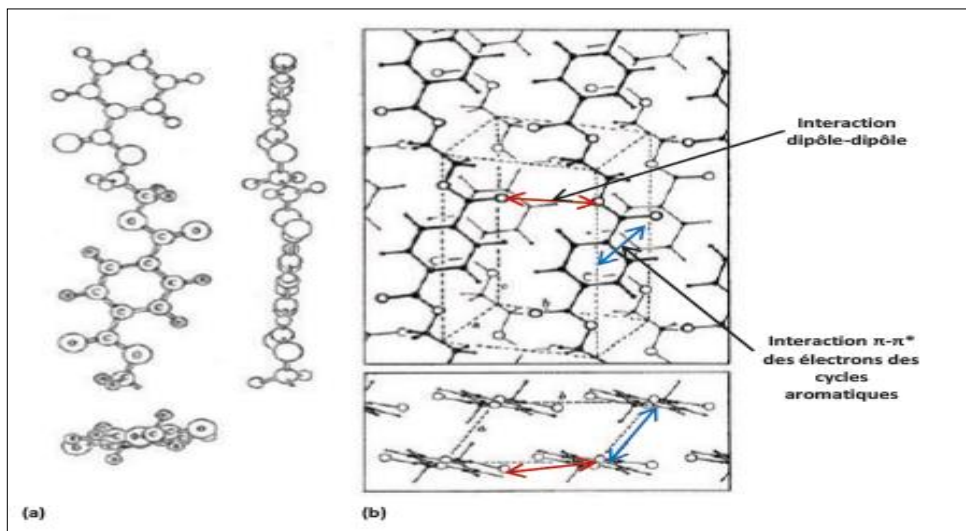


Figure I.7 : Configuration (a) de la molécule et (b) de la maille élémentaire triclinique du PET semi-cristallin [29].

Le PET semi-cristallin possède une structure caractérisée par un mélange de zones cristallines et amorphes. La présence de zones cristallines renforce la résistance et la rigidité du matériau, tandis que les zones amorphes contribuent à la ductilité et à la résistance aux chocs [32]. Ainsi, une même chaîne macromoléculaire peut s'étendre dans les deux phases amorphe et cristalline (Figure I.8) [33].

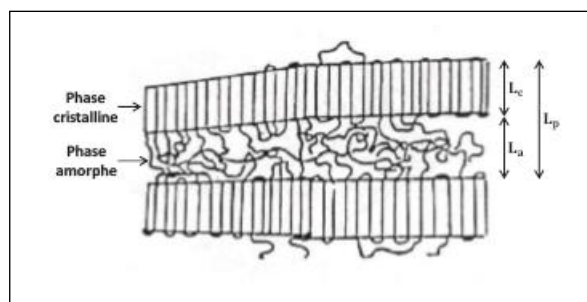


Figure I.8. Schéma de la structure lamellaire d'un polymère semi-cristallin [32].

#### I.5.1.4. Dégradation du PET

À des températures élevées, les chaînes macromoléculaires peuvent se dégrader, entraînant une perte de propriétés mécaniques et une fragilisation du matériau. En parallèle, la chaleur favorise la réorganisation des chaînes polymériques, permettant une mobilité accrue. Cela peut entraîner une transition vers un état plus fluide, affectant la structure globale. Le vieillissement physique des matériaux peut se produire à l'état solide, tandis que la dégradation chimique des matériaux se produit principalement lors de l'exposition à des températures élevées (dégradation thermique), particulièrement lors de l'établissement à l'état fondu des polymères.

##### I.5.1.4.1. La dégradation hydrolytique

L'eau peut provoquer des hydrolyses, entraînant la rupture des liaisons dans les chaînes macromoléculaires. Ce processus peut entraîner une perte de résistance mécanique et une fragilisation du matériau. Contrairement à un processus réversible, la dégradation est permanente, affectant la performance à long terme du polymère. (voir Figure I.9). On observe simultanément que la partie cristalline est moins sensible à l'hydrolyse, du moins jusqu'à un certain stade d'évolution du vieillissement [34].

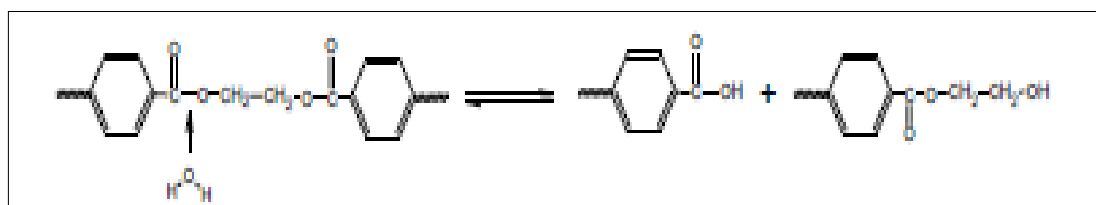


Figure I.9. Dégradation hydrolytique du PET.

Il est possible de suivre la décomposition des longues chaînes moléculaires en mesurant les extrémités contenant des groupes carboxyliques. Cependant, il est important de noter que ces groupes peuvent également se former lors d'une dégradation thermique. Ainsi, l'évaluation de la réactivité du matériau face à l'hydrolyse est réalisée en exposant un échantillon solide à une

température de 100°C avec un contrôle précis de l'humidité [35]. Le degré de dégradation observé lors de la dégradation hydrolytique est nettement supérieur à celui constaté lors des dégradations thermique et oxydative [34].

Les travaux menés par N.S. Allen et ses collègues ont exploré comment différents temps et températures de recuit influencent la stabilité et la durabilité du PET amorphe. Leur constatation majeure a été que la présence d'eau agit comme un plastifiant, augmentant la mobilité moléculaire. Ceci a entraîné une cristallinité accrue dès les premières coupures de chaînes, marquant le début de la dégradation. L'hydrolyse représente ainsi un risque significatif, car même une faible humidité peut avoir des conséquences néfastes sur les propriétés du matériau. Il est important de surveiller le PET quand il est soumis à des conditions thermiques variées, en contrôlant précisément la température et le niveau d'humidité. Cela contribue à une meilleure compréhension de la durabilité du PET et de ses performances dans divers environnements.

#### **I.5.1.4.2. La dégradation thermique**

La dégradation de ce genre est habituellement examinée dans des conditions de vide ou en atmosphère neutre, excluant la présence d'oxygène. Elle se caractérise par l'apparition de vinylesters et d'acides carboxyliques aux extrémités de la chaîne.

Les chercheurs Holland et ses collègues, dans leur étude [37], les mécanismes de dégradation des polymères, en particulier en relation avec l'humidité et la température. Ils ont examiné comment ces facteurs influencent la structure et les propriétés des matériaux, notamment en ce qui concerne le vieillissement hydrolytique du PET. Leur travail a permis d'établir des corrélations entre les conditions environnementales et la durabilité des polymères. Les auteurs ont proposé un mécanisme de formation spécifique au cours du processus de dégradation (voir Figure I.10).

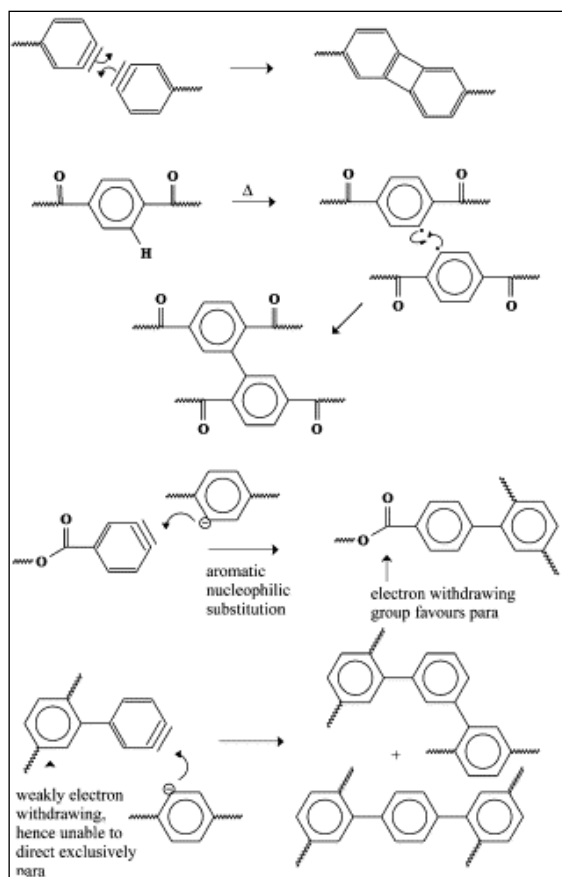


Figure I.10. Mécanismes possibles expliquant la formation d'un réseau aromatique au cours de la dégradation thermique du PET [37].

Les analyses thermiques ont permis d'identifier la présence d'un réseau aromatique. Cependant, il convient de noter que ces propositions restent douteuses, car aucune autre étude n'a été en mesure de confirmer ces mécanismes jusqu'à présent.

Lors de dégradations sévères à des températures élevées, la détection d'anhydrides a été réalisée. Cela est dû à des réactions de déshydratation impliquant deux groupes d'acides carboxyliques situés aux extrémités de la chaîne [38].

Le vieillissement thermique du PET est couramment étudié par thermogravimétrie (ATG) dans des conditions de dégradation totale, en employant une atmosphère inerte.

## I.6. Vieillessement des polymères

### I.6.1. Définition

La dégradation est définie par un processus de changement irrémédiable très lent de la composition moléculaire du matériau, ces altérations conduisent à la dégradation des propriétés fonctionnelles des matériaux. On remarque aussi que ces développements peuvent apparaître du à l'instabilité propre du matériau ou de son environnement [39].

Il y a deux principales catégories de vieillissement à prendre en compte :

- La dégradation physique au sens le plus étendu où Le vieillissement de ce matériau ne conduit pas à des changements dans sa structure chimique, notamment les chaînes polymères qui conservent leur intégrité. Ce type de vieillissement est essentiellement réversible.
- L'exposition à l'oxygène et à la chaleur peut entraîner la rupture des liaisons chimiques dans les chaînes polymériques.

Les signes de dégradation ne sont pas toujours visibles immédiatement, ce qui rend difficile l'évaluation de l'état d'un matériau au fil du temps. L'effet combiné de l'humidité, de la température et de la lumière sur le vieillissement peut compliquer l'interprétation des résultats expérimentaux. Par conséquent, Ces défis nécessitent des techniques analytiques avancées et une approche multidisciplinaire pour mieux comprendre et caractériser le vieillissement des matériaux polymères.

### **I.6.2. Hydrolyse des polymères**

Lorsque les polymères composites vieillissent dans des environnements humides, ils sont alors sujets d'apparition des molécules dans leur matrice, ceci engendre un phénomène de dégradation irréversible Effectivement, les polyesters insaturés possèdent des liaisons ester au sein de leurs structures macromoléculaires, ce qui les rend susceptibles d'être hydrolysés en présence d'eau. Ce processus d'hydrolyse entraîne des coupures dans le réseau thermodurcissable du matériau, qui se traduisent par des mouvements de liquides à travers la matrice du matériau.

Ces phénomènes osmotiques peuvent contribuer au vieillissement et à la dégradation du matériau dans des environnements humides. Par conséquent, il est crucial de surveiller attentivement ces processus pour prévenir des dégradations potentiellement importantes dans les applications où des polymères composites sont exposés à des conditions humides. Montaigne et al. [51] ont analysé les facteurs qui contribuent au vieillissement, tels que la chaleur, l'humidité et la lumière pour évaluer les changements dans la structure et les propriétés des matériaux vieillissants ainsi qu'analyse des facteurs qui contribuent au vieillissement. Ils ont observé détachement progressif des couches de matériau les unes des autres. Ce délaminage compromet la cohésion du matériau et peut entraîner une dégradation significative de ses propriétés mécaniques et structurelles. Cette recherche met en lumière l'intérêt d'apprécier convenablement les facteurs qui contribuent au vieillissement pour acquérir des stratégies de prévention et de durabilité pour les applications en environnements humides Par conséquent, le processus d'hydrolyse évolue de la manière suivante (Figure I.11) :

Durant l'hydrolyse des polyesters insaturés, les petites molécules organiques générées par la réaction s'accumulent dans les imperfections structurelles et entre les points de réticulation du réseau du matériau composite. Cette injection d'eau provoque le gonflement des défauts, conduisant à la formation de poches d'eau.

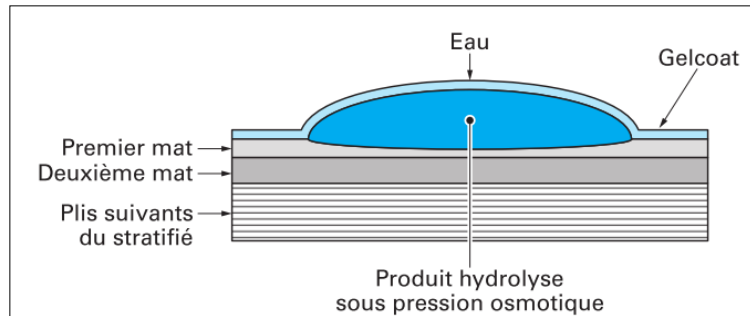


Figure I.11. Phénomène d'osmose dans un composite polyester insaturé [40].

### I.6.2.1. Détérioration des propriétés diélectriques

Dans le cadre d'une recherche scientifique impliquant deux laboratoires de recherche (SSE et G2Elab) [41], des investigations ont été menées sur le vieillissement hygro-thermique d'une résine époxy, comme présenté dans la figure I.12.

Selon les données illustrées dans la figure I.13, une observation notable émerge après 74 jours de vieillissement hygro-thermique : la tension de claquage a diminué d'un facteur de 10 pour les microparticules non traitées en surface. Cette diminution souligne de manière significative l'efficacité du traitement de surface, mettant en lumière son rôle crucial. Dans le matériau non traité résine il apparaît toujours une tension des décharges partielles (PDIV) stable à 12 kV pendant les 32 premiers jours de vieillissement, comme le montre la figure I.13(b). Par la suite, il apparaît un déclin jusqu'à 500 V. Les chercheurs expliquent ce déclin par une consommation d'eau du matériau et devient conducteur.

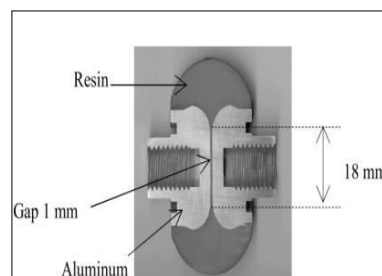


Figure I.12. Photographie de l'échantillon époxyde avec des électrodes moulées [41].

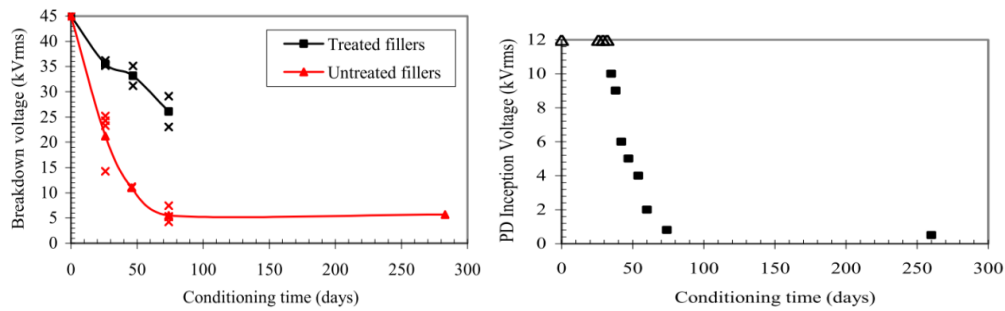


Figure I.13. Le graphique illustre l'évolution des paramètres électriques en fonction de la durée de vieillissement hydro-thermique:

### I.6.2.2. Détérioration des propriétés mécaniques

La dégradation par hydrolyse peut affecter directement les propriétés mécaniques. De nombreux travaux de recherches ont portés leurs investigations sur le vieillissement des polymères [42 43 44]. Ces recherches visent à mieux comprendre comment l'exposition à l'humidité et aux températures élevées peut altérer la résistance, la ténacité et d'autres caractéristiques mécaniques essentielles de ces matériaux composites. Ces informations sont cruciales pour évaluer la durabilité et la résistance des polymères dans diverses applications industrielles.

Foulc et al. [45] ont expliqué que lorsque L'eau pénètre dans la structure du PET, elle provoque une plasticisation du matériau. En conséquence, le module de Young, qui mesure la rigidité, diminue, rendant le matériau plus. La figure I.14 montre présente l'effet du temps de vieillissement hygro-thermique sur la rigidité mécanique. Dans le cadre de cette recherche, différents mécanismes ont été observés :

- L'absorption d'eau par le polyéthylène téréphtalate permet à l'hydrolyse des chaînes polymérisées, provoquant ainsi la rupture des liaisons au niveau moléculaire [46].
- L'hydrolyse engendre des oligomères qui se répartie dans le matériau avant de cristalliser progressivement avec le temps.
- Les oligomères générés changent l'hydrophilie du matériau et sa forme chimique, entraînant ainsi un impact significatif sur son taux d'absorption d'eau.

Ces interprétations visent à élucider les mécanismes sous-jacents responsables de la dégradation mécanique du PET en raison du vieillissement hygro-thermique, et elles permettent de mieux comprendre les changements de rigidité mécanique observés au fil du temps.

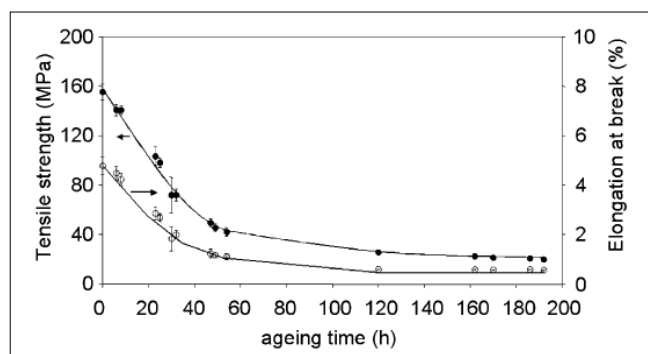


Figure I.14. Etude de la contrainte à la rupture du PET en fonction du temps de vieillissement (chargé à 30% en fibres de verre) [45].

### I.6.3. Erosion sous l'effet des décharges surfaciques

Il est essentiel de concevoir des systèmes d'isolation qui résistent aux impacts pour garantir leur performance à long terme. Ils peuvent provoquer des fissures, des déformations ou des ruptures dans les matériaux isolants, compromettant leur efficacité. Ils peuvent aussi créer des voies d'infiltration pour l'eau, entraînant des problèmes d'humidité et de moisissures favorisant ainsi les décharges rampantes et les courts-circuits sous l'influence d'un champ électrique. Les contraintes environnementales peuvent donner lieu à des processus complexes, [47,48].

Des traitements ou des revêtements spécifiques peuvent être appliqués pour renforcer la résistance de la surface du matériau, permettant ainsi de prévenir les effets néfastes liés à la contamination, aux décharges rampantes et à la carbonisation. En assurant une surface durablement hydrophobe, les performances électriques de l'isolant peuvent être maintenues à un niveau optimal et ses propriétés isolantes préservées.

Le développement des composites nanopolymériques offrent des propriétés mécaniques, thermiques et électriques supérieures par rapport aux polymères traditionnels. Ils sont généralement plus légers, utilisés dans des domaines tels que l'électronique, la biomédecine et les matériaux de construction. Ils représentent un domaine prometteur avec des applications potentielles variées.

Pour optimiser leur performance, la production des nanocomposites doit tenir en compte des propriétés mécaniques, électriques et thermiques, tels que la rigidité, la conductivité et les températures élevées.

Les décharges partielles peuvent être préjudiciables, entraînant une détérioration progressive de l'isolant, pouvant éventuellement conduire à une défaillance du système électrique.

L'introduction de nanoparticules ou de nanocharges dans la matrice polymère permet d'améliorer les propriétés électriques des nanocomposites. Cela rend les nanocomposites plus appropriés pour les applications électriques et électroniques où la fiabilité et la durabilité des matériaux isolants sont essentielles.

La résistance aux décharges partielles peut être améliorée en utilisant des polymères et composites de haute qualité, appliquer des revêtements protecteurs ou modifier la surface des matériaux, Incorporer des nanoparticules ou des agents de renforcement qui augmentent la résistance à l'électrification.

Ces stratégies contribuent à renforcer la fiabilité et la durabilité des matériaux dans des applications électriques et électroniques.

### **I.6.3.1. Mécanismes de dégradation conventionnels**

Les systèmes d'isolation peuvent être sous la forme d'un gaz, solide ou une isolation mixte. Le gaz pour l'isolation dans des applications haute tension en raison de leurs propriétés diélectriques, Les matériaux solides souvent utilisés dans les câbles et les composants électroniques, les systèmes mixtes pour tirer parti des avantages de chacun, améliorant ainsi les performances d'isolation. Les décharges qui apparaissent en surface d'un isolant solide sont généralement appelées "décharges partielles" et surviennent autour de défauts, d'inclusions, ou de discontinuités dans le matériau isolant, où les concentrations de champ électrique sont plus élevées.

Quand un isolant solide subit des décharges, on remarque figure I.15

- Une rupture des liaisons chimiques, entraînant une dégradation du matériau.
- Des chemins conducteurs peuvent se former sur la surface de l'isolant, réduisant son efficacité.
- Les décharges génèrent de la chaleur, ce qui peut provoquer des dommages thermiques.

Lors des tests d'évaluation, il est fréquent d'observer des décharges surfaciques, comme dans le cas du système d'électrode IEC (b) qui utilise des électrodes cylindre-plan. Les charges positives et négatives produits par les décharges partielles sont activés suite l'influence du champ électrique utilisé, ce qui produit des chocs électroniques sur la surface interne ou externe du polymère solide. Ces impacts peuvent causer des dommages à la surface, entraînant ainsi deux types de dégradation : la dégradation physique et la dégradation chimique.

L'impact des ions et des électrons sur la surface de l'isolant sans présence d'oxygène peut produire des défauts dans la structure cristalline ou amorphe, affectant la résistance et l'intégrité mécanique et des fissures ou des érosions de la surface.

Par contre, dans un environnement contenant de l'oxygène, c'est le processus de dégradation chimique qui prend le dessus. L'oxygène engendre des modifications chimiques et génère ainsi des produits de décomposition.

En présence d'azote, il apparaît des vacuoles à la surface du polymère, ce qui peut affaiblir l'isolant et réduire ses performances électriques.

Les décharges partielles peuvent générer des volumes très petits de plasma extrêmement chaud, atteignant des températures élevées en très peu de temps.

Lorsque les matériaux polymères sont exposés à des températures élevées de cette manière, ils subissent une transformation structurale. Cela conduit généralement à la destruction irréversible du polymère.

Pour le polyéthylène, par exemple, des processus de dégradation ont été observés et confirmés, comprenant :

- Il peut commencer à fondre, perdant sa forme et sa structure.
- Il peut s'oxyder, entraînant une dégradation chimique et une perte de propriétés mécaniques.
- Cela entraîne la rupture des liaisons polymériques, ce qui réduit la résistance, la flexibilité et d'autres propriétés.

Ces réactions chimiques et les produits formés peuvent altérer les propriétés du polymère et compromettre ses performances en tant qu'isolant électrique.

L'effet de décharges électriques fait apparaître généralement une érosion de la surface. La figure I.16 représente de manière visuelle ces processus fondamentaux de détérioration. Dans le cas d'échantillons minces, la diminution de l'épaisseur due à l'érosion peut entraîner directement à la rupture du matériau. Cependant, pour les échantillons épais, la réduction d'épaisseur n'est pas uniforme et peut être plus complexe à anticiper. Les décharges électriques produisent des zones concaves sur la surface, créant une surface rugueuse. Dans ces zones concaves, le champ électrique est intensifié, ce qui peut conduire à la formation de nouvelles décharges électriques, amplifiant la forme de ces zones concaves. Ce phénomène d'érosion peut conduire à la formation d'arborescences ou de chemins conducteurs à travers le matériau, et dans certains cas, cela peut entraîner un claquage diélectrique complet dans des échantillons épais.

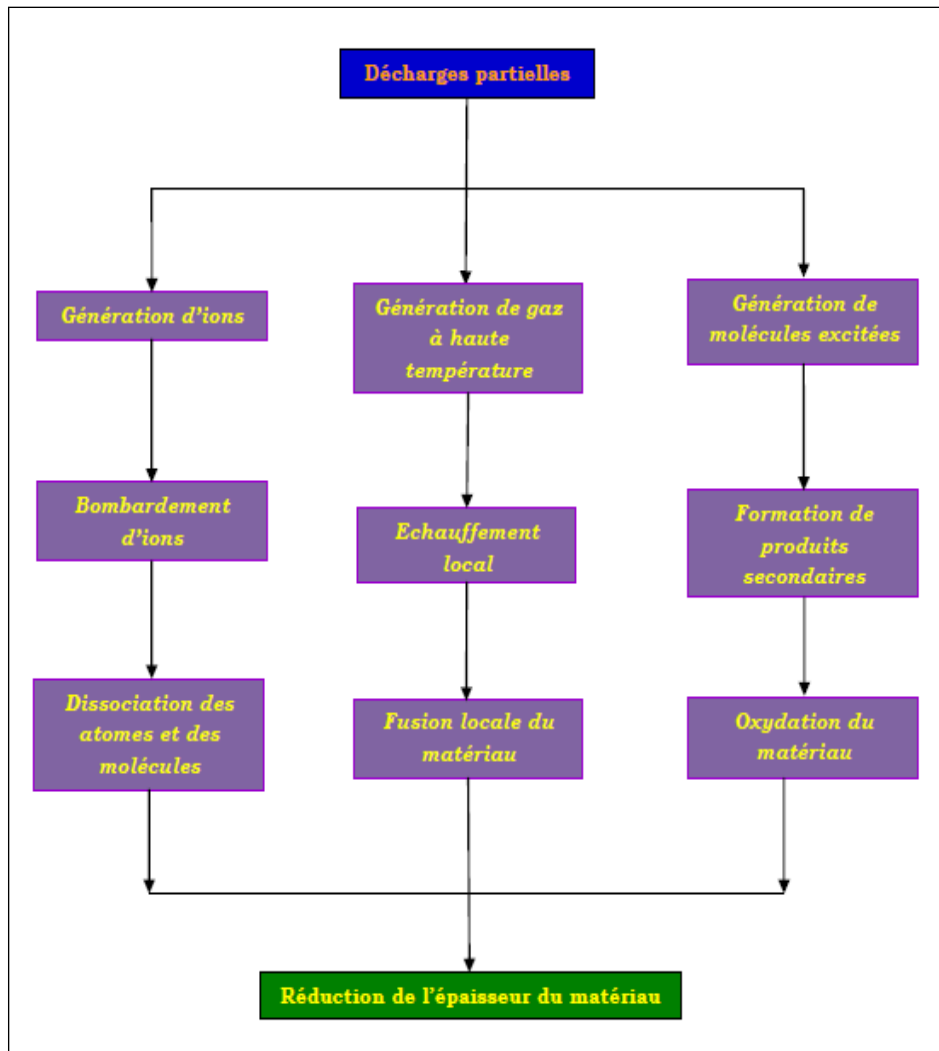


Figure I.15. Processus physico-chimiques de l'érosion des polymères sous l'effet des décharges partielles [49].

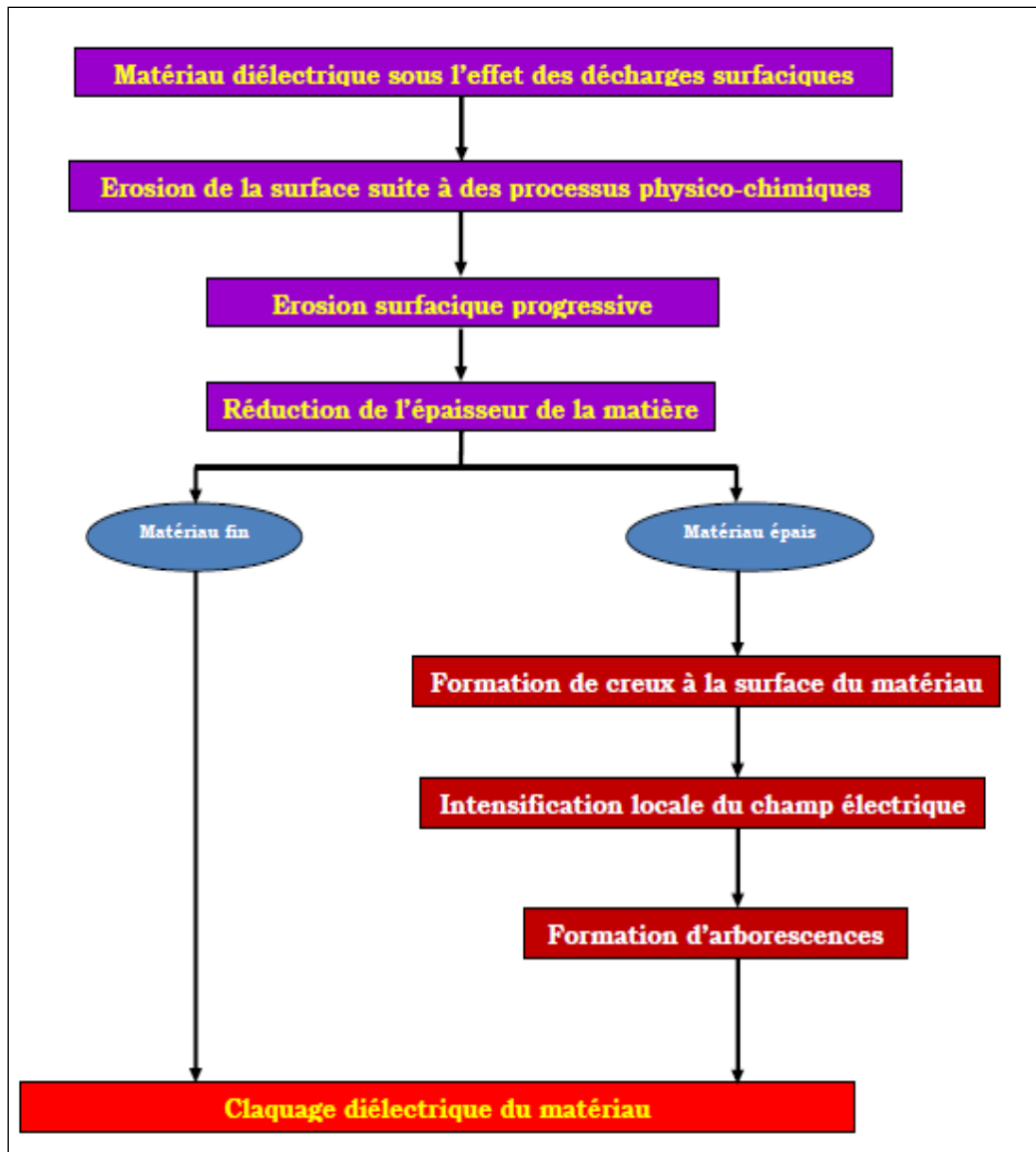


Figure I.16. Dégradation du polymère après érosion sous l'effet des décharges partielles [63].

## I.7. Différentes techniques de chargement des polymères

### I.7.1. Charge par effet triboélectrique

Le chargement par effet triboélectrique se produit lorsque deux matériaux sont frottés l'un contre l'autre, entraînant un transfert d'électrons d'un matériau à l'autre. Lorsque deux surfaces entrent en contact et sont ensuite séparées, des électrons peuvent être transférés d'un matériau (celui qui perd des électrons) à l'autre (celui qui en gagne). Le phénomène dépend des propriétés triboélectriques des matériaux impliqués, souvent classés dans une série de triboélectricité. Dans certaines situations, cela peut entraîner des problèmes comme l'accumulation de charges électrostatiques, pouvant provoquer des décharges et des défaillances dans les équipements électroniques. La figure I.17 illustre un exemple de chargement par frottement et à atteindre des potentiels de surface variables [52].

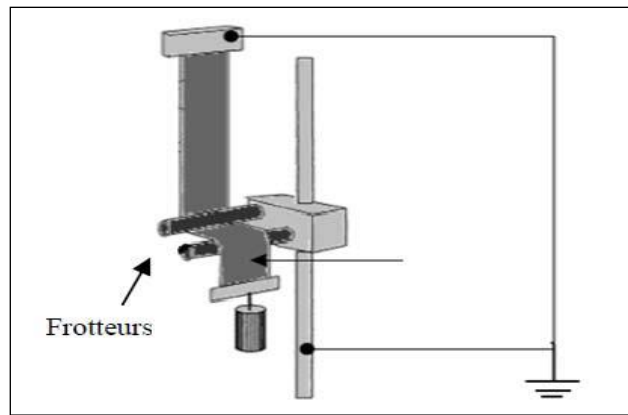


Figure I.17. Dispositif de charge par effet triboélectrique [52].

### I.7.2. Charge par rouleau électrostatique

Le chargement par rouleau électrostatique est un procédé qui utilise un rouleau pour transférer des charges électrostatiques à des surfaces ou des matériaux [53,54].

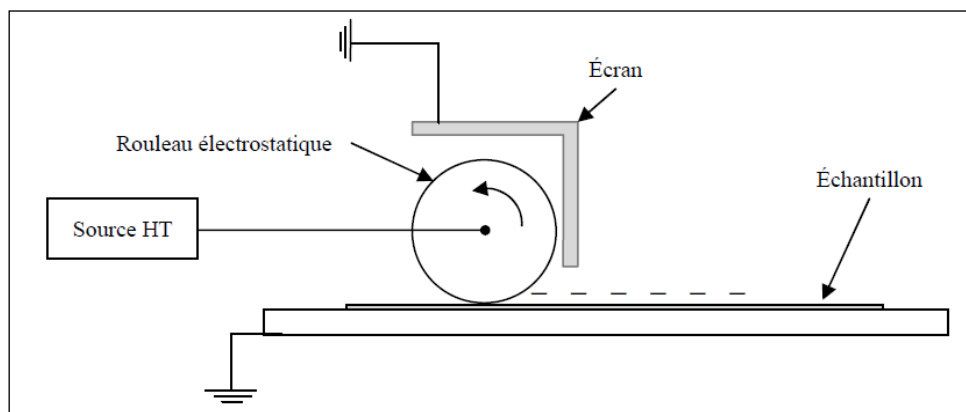


Figure I.18. Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique [54].

Un rouleau conducteur ou chargé électriquement est mis en contact avec un matériau, transférant des charges par conduction ou par effet triboélectrique. Utilisé dans des processus comme l'impression électrostatique, le laminage, et la fabrication de films, où un contrôle précis de la charge est nécessaire. Ce procédé permet une distribution uniforme des charges, améliorant l'adhérence des revêtements ou l'efficacité des processus de fabrication figure I.18.

### I.7.3. Charge par décharge couronne

Généralement, on utilise les décharges électriques dans l'industrie principalement en deux catégories : les applications électrostatiques avancées et la synthèse chimique ou l'électrolyse. Cette dernière application donnait actuellement un intérêt significatif, exploite divers types de particules réactives générées par la décharge au sein des gaz plasmagènes.

La décharge couronne, caractérisée par son fort pouvoir de dissociation, permet la production efficace d'ozone à partir d'un taux élevé d'oxygène ou d'air sec. Initialement appliqués au traitement de surface des matières plasmatisées, ces procédés de décharge couronne trouvent notamment application dans l'oxydation de surface.

La décharge couronne trouve son utilisation prédominante dans le processus de fabrication pour la synthèse de l'ozone, comme illustré ci-dessous. Son fort pouvoir de dissociation est exploité pour produire de l'ozone à partir d'un taux élevé d'oxygène ou d'air sec. Le traitement de surface regroupe diverses techniques visant à modifier les propriétés d'une surface sans altérer la structure des matériaux tels que Revêtements, passivation, litrage et traitement thermique. Un exemple concret est l'imperméabilisation, où ce type de traitement était en cours de développement. Contrairement aux méthodes antérieures impliquant principalement l'utilisation de solutions micro-ondes, l'utilisation de la décharge couronne offre des équipements fiables et économiques.

D'un autre côté, La décharge couronne peut également jouer un rôle important dans le diagnostic, notamment dans le domaine de l'inspection des équipements électriques et des lignes à haute tension. Elle peut indiquer des anomalies dans les systèmes électriques, comme des isolants défectueux. De plus, des systèmes de surveillance peuvent être mis en place pour détecter les décharges couronne en temps réel, permettant une maintenance préventive et réduisant les risques de pannes.

### **I.7.3.1. Quelques propriétés des décharges couronnes**

La réalisation d'un plasma hors-équilibre stable à pression atmosphérique représente une tâche complexe, en raison du risque de déclenchement violent et incontrôlé du claquage, pouvant entraîner rapidement des courants très élevés. L'utilisation d'une géométrie d'électrodes fortement inhomogène, créant ainsi des micro-décharges peut maintenir ce plasma par une extension de la zone du champ. Dans cette configuration, on utilise généralement une géométrie pointe/plan. Diverses configurations, schématisées sur la figure I.19, sont généralement adoptées. Il est possible de distinguer la décharge couronne positive et celle négative.

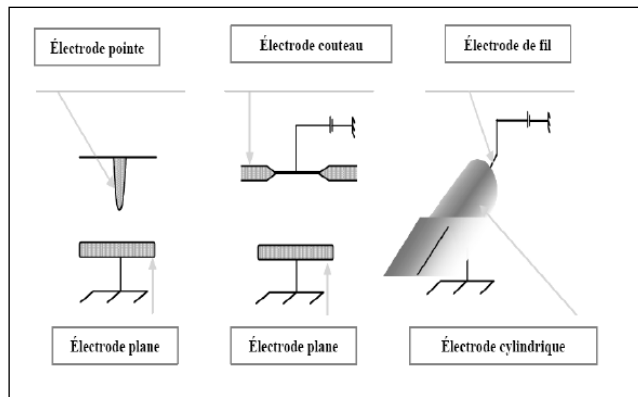


Figure I.19. Les différentes configurations dans le cas d'une décharge couronne [56].

### I.7.3.1. 1. Décharges couronnes positives

Dans cette configuration, l'électrode à faible rayon de courbure est alimentée positivement, entraînant à l'observation de trois régimes distincts classés par ordre croissant de tension appliquée. À basse tension, on note initialement un régime où on enregistre de faibles impulsions de courant, sur une durée d'environ 20 nanosecondes, persistant pendant quelques centaines de nanosecondes. Ces éclats lumineux se forment à proximité immédiate de l'électrode fortement courbée, résultant d'une avalanche initiée à cet endroit.

Au cours de cette avalanche, une charge d'espace se développe radialement sur l'électrode courbée, affaiblissant le champ total et rendant la décharge insoutenable, empêchant ainsi le déclenchement d'une nouvelle avalanche.

L'épuisement des électrons se produit soit par attachement aux molécules de gaz, soit par absorption. Les électrons peuvent se lier à des molécules neutres pour former des ions négatifs, réduisant ainsi le nombre d'électrons libres. Les électrons peuvent également être captés par l'anode. Ce processus contribue à la réduction de la densité d'électrons dans la région proche de l'anode. Ces mécanismes jouent un rôle clé dans la dynamique des décharges électriques et le fonctionnement des dispositifs électroniques. Cette propriété est exploitée dans les compteurs Geiger pour évaluer l'intensité du rayonnement radioactif en fonction de la fréquence des décharges générées dans un circuit.

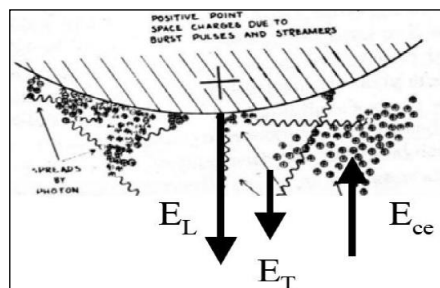


Figure I.20. Schéma d'un éclat de décharge (Burst) montrant la charge d'espace positive se construit au voisinage de la cathode et comment la photo-ionisation permet l'étalement radial de la charge d'espace [59].

L'augmentation de la tension dans un gaz peut entraîner le développement de streamers, qui sont des décharges électriques rapides et localisées. À mesure que la tension augmente, le champ électrique dans le gaz peut atteindre un seuil critique. Cela provoque l'ionisation de quelques molécules de gaz, créant des électrons libres et des ions positifs. Les électrons nouvellement créés peuvent gagner suffisamment d'énergie pour ioniser d'autres molécules en colludant avec elles, entraînant une multiplication exponentielle des électrons. Une fois que le nombre d'électrons atteint un certain niveau, un processus appelé "formation de streamer" commence. Les électrons se déplacent rapidement vers l'anode, tandis que les ions se déplacent vers la cathode, créant une structure filamentaire qui s'étend dans le gaz. Les streamers se propagent rapidement à travers le gaz, générant une forte luminosité et une libération d'énergie. Ils peuvent se développer en plusieurs branches, formant des motifs complexes [60].

En présence d'un gaz avec un fort pouvoir d'attachement, les avalanches génèrent un nuage d'ions négatifs près de l'anode, créant ainsi un intense champ de charge d'espace à proximité de la décharge Fig. I.20. Cette région, confinée entre le nuage d'ions négatifs et l'anode, est caractérisée par un champ électrique puissant. Un fort pouvoir d'attachement du gaz peut conduire à un claquage de type Townsend ou à la formation d'un nuage d'électrons négatifs agissant comme une cathode.

Les électrons produits sont accélérés vers l'anode, provoquant une ionisation significative dans cette zone. Les ions positifs issus de cette ionisation sont neutralisés.

Les pertes d'ions négatifs sont compensées par les réactions d'attachement déclenchées par une fraction des photoélectrons (comme illustré dans la figure I.20), engendrant ainsi un régime de décharge stable, stationnaire et auto-entretenu. À mesure que la tension augmente, les streamers générés prennent de l'ampleur et atteignent finalement la cathode (conformément à la figure I.21). Lorsque le champ électrique entre la cathode et l'anode augmente une onde d'ionisation qui se propage alors de la cathode vers l'anode. Cela se produit lorsque les électrons libres sont accélérés par le champ électrique, ce qui les rend capables d'ioniser d'autres molécules de gaz. À mesure que l'onde d'ionisation progresse, elle génère des ions et des électrons, équilibrant ainsi le potentiel entre les deux électrodes. Cela contribue à maintenir un courant électrique à travers le gaz. [61].

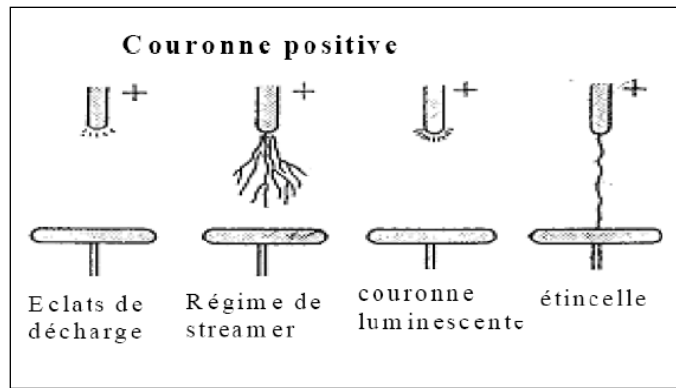


Figure I.21. Différents régimes de décharges couronnes en fonction de la tension. Cette dernière augmente quand on va de gauche à droite [57].

### I.7.3.1. 2. Décharge couronne négative

L'utilisation d'une géométrie pointe /plan produit un champ électrique inhomogène (Figure I.22). Dans de telles conditions, une avalanche électrique se forme jusqu'à ce que le champ électrique ne soit plus suffisant pour maintenir la multiplication électronique à une certaine distance. Ces mécanismes contribuent à la formation d'une charge d'espace ionique entre les électrodes [62]. L'onde d'ionisation se déplace à une vitesse qui dépend des conditions du gaz, de la tension appliquée et d'autres facteurs. Ce processus peut donner lieu à des structures de décharge, comme les streamers ou les arcs électriques (Figure I.22).

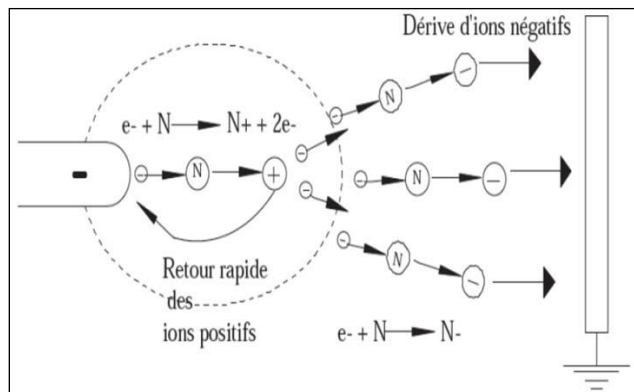


Figure I.22. Description de la décharge couronne négative.

### I.7.3.1. 3. Décharge couronne alternative

Dans ce cas, l'évolution de la décharge sous une excitation alternative suit des principes similaires à ceux décrits pour une excitation continue. Elle se produit lorsque des tensions alternatives (AC) induisent des champs électriques élevés, provoquant une ionisation de l'air autour des conducteurs. Elle peut être influencée par la fréquence  $f$  du courant alternatif et la distance entre les deux électrodes  $d$  [64].

$$d_{\max} = \frac{\mu E}{\pi f} \Rightarrow f_{\max} = \frac{\mu E}{\pi d} \dots \dots \dots (I. 1)$$

Avec  $\mu$  la mobilité des ions et  $E$  l'amplitude du champ électrique.

## I.8. Phénomènes physiques dans le processus de déclin

Modéliser les phénomènes d'évolution des charges statiques sur la surface du polymère est très complexe vu leurs sensibilités et leurs dépendances d'un nombre important de facteur. Explorons brièvement les différents mécanismes de leur évolution.

### I.8.1. Conduction de surface

La conduction de surface se produit lorsque des décharges électriques se déplacent le long de la surface d'un isolant, Cela peut entraîner une détérioration de l'isolant. Dans des échantillons plus épais, les charges accumulées peuvent provoquer une plus grande concentration d'énergie à la surface. Les charges se propagent à travers les couches superficielles. L'exposition fréquente d'un isolant à des décharges entraîne une modification rapide et marquée de ses propriétés de surface [65].

En présence d'oxygène, une structure fortement oxydée se forme sur toute la surface, présentant des propriétés physico-chimiques considérablement différentes du matériau initial, ce qui génère des fissures, des défauts et une diminution de l'efficacité isolante et la formation d'ozone et d'autres produits corrosifs qui aggravent la dégradation [66].

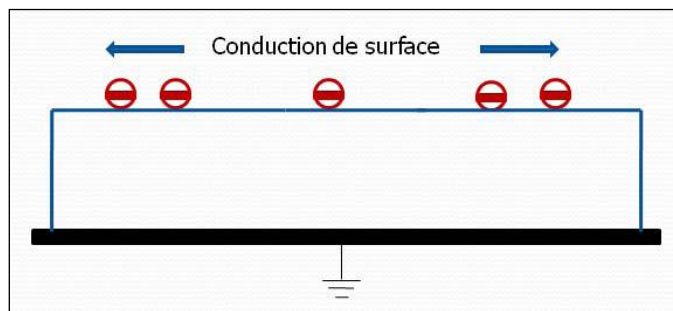


Figure I.23. Conduction de surface.

### I.8.2. Polarisation de l'échantillon

Plusieurs études [67, 68] ont suggéré que les phénomènes de polarisation contribuent significativement à la diminution du potentiel. Les charges surfaciques modifient le champ à l'intérieur du matériau. Sous l'influence de ce champ, les dipôles s'alignent pour neutraliser la charge en surface. Cependant, la mobilité de ces charges se limite à une distance de l'ordre d'une molécule, entraînant le développement de dipôles moléculaires.

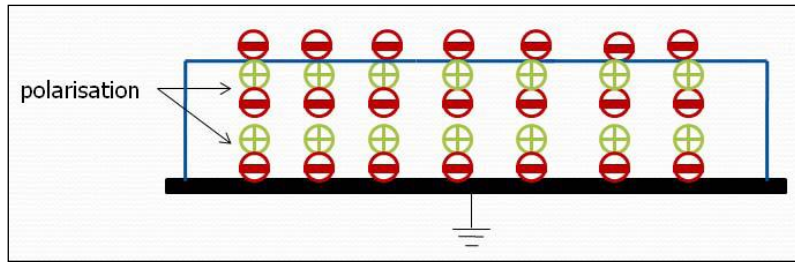


Figure I.24. Polarisation de l'échantillon.

### I.8.3. Neutralisation par le gaz

La diminution du potentiel de surface peut découler de l'air environnant qui peut contenir des ions libres générés par l'ionisation due à des champs électriques élevés ou à des décharges. Ces ions peuvent se recombinaer avec les charges déposées sur la surface de l'isolant, neutralisant ainsi la charge [69].

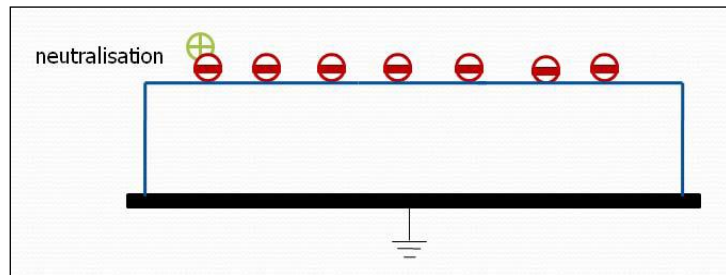


Figure I.25. Neutralisation par le gaz.

### I.8.4. Phénomènes piézoélectriques

L'effet piézoélectrique a souvent été mentionné en tant que processus physique pouvant contribuer au déclin du potentiel [70].

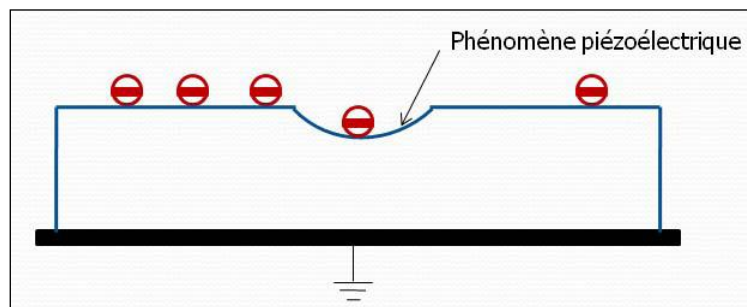


Figure I.26. Phénomène piézoélectrique.

L'effet piézoélectrique dans les matériaux isolants est un phénomène qui se produit lorsque certaines substances génèrent une charge électrique en réponse à une contrainte mécanique.

L'effet piézoélectrique est lié à la structure asymétrique des cristaux. Lorsqu'une force est appliquée, les charges positives et négatives se déplacent, générant un champ électrique de plus, la déformation élastique des matériaux entraîne une redistribution des charges électriques à l'intérieur du matériau [71].

### I.8.5. Injection de charges

L'injection de charge permet de transférer les porteurs de charge déposés en surface à travers toute l'étendue du matériau isolant, induisant ainsi une modification des propriétés électriques d'une partie du volume, qui se charge en conséquence.

La qualité de l'interface ou du contact avec un matériau différent joue un rôle crucial. Des champs électriques appliqués peuvent injecter des charges dans le polymère, en particulier dans des zones avec des défauts ou des impuretés. La décomposition des liaisons moléculaires sous l'effet d'un champ électrique peut créer des électrons libres ou des ions. L'injection de charges augmente la conductivité du polymère, pouvant le transformer en un conducteur partiel [74].

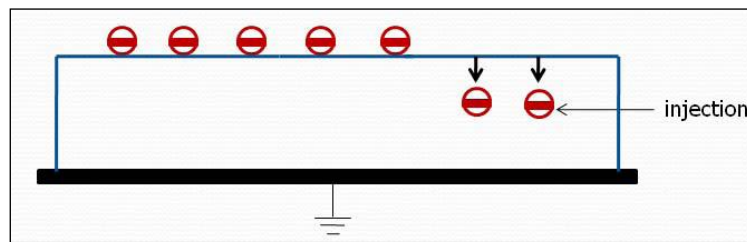


Figure I.27. Injection de charges.

## I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré une synthèse bibliographique, abordant diverses notions sur les polymères, leur structure, et des applications spécifiques. Par la suite, nous avons exposé différentes techniques de chargement, mettant particulièrement en avant la décharge couronne en tant que méthode optimale pour charger les polymères. Celle-ci se révèle cruciale dans le processus de traitement par voie électrostatique, tout en explorant les phénomènes physiques à l'origine du déclin de potentiel.

## **Chapitre II : Théorie Sur Les Phénomènes D'évolution Du DPS**

## II.1. Introduction

Les polymères sont énormément établis comme de parfaits diélectriques, et leur importance dans l'industrie et la communauté scientifique est bien établie. Cependant, Il revêt une importance capitale de saisir les évolutions chimiques susceptibles d'affecter ces matériaux lors de leur utilisation dans le domaine de la haute tension, notamment en réaction aux diverses contraintes climatiques ou électriques. Cette compréhension est cruciale en raison des enjeux significatifs sur les plans scientifique et technique, comme évoqué dans les références [74,75].

Lorsque les polymères sont soumis à des décharges électriques en surface ou à l'intérieur du matériau, en présence d'atomes de carbone, cela peut entraîner des changements significatifs dans la structure chimique du polymère. Les décharges partielles peuvent provoquer des dégradations du matériau, déclenchant ainsi plusieurs réactions chimiques.

En conséquence, le polymère peut passer de son état initial d'isolant électrique à celui de conducteur électrique en raison de ces dégradations. Les réactions chimiques induites par les décharges électriques peuvent modifier les propriétés électriques du matériau, entraînant une conductivité accrue et réduisant ainsi sa capacité d'isolation.

Le système d'isolation électrique se trouve confronté à diverses contraintes, notamment thermiques, environnementales, mécaniques et électriques. Il est crucial de comprendre les mécanismes associés à ces contraintes, tant au niveau du matériau isolant que du système d'isolation dans son ensemble.

Ce chapitre se consacre à la recherche et aux travaux visant à appréhender les divers comportements du système d'isolation. En d'autres termes, il est essentiel d'analyser et d'étudier l'évolution des charges statiques présentes à la surface et à l'intérieur de l'isolant pour une compréhension approfondie.

La capacité de comprendre et d'analyser ces mécanismes permet de mieux concevoir et évaluer la performance des matériaux isolants dans des conditions réelles et exigeantes.

La méthode d'analyse connue sous le nom de "déclin de potentiel en surface" présente plusieurs avantages, notamment sa simplicité et son caractère sans contact. Elle permet d'évaluer le potentiel de surface sans toucher le matériau, ce qui évite tout risque de contamination ou d'endommagement. Les mesures peuvent être effectuées rapidement, permettant une évaluation en temps réel. Bien que simple, la méthode peut nécessiter des calibrations précises pour garantir des résultats fiables.

Dans ce chapitre, nous étudions certaines caractéristiques du matériau utilisé dans notre étude, la cinétique des charges statiques et les différents facteurs qui influent sur cette évolution.

## II.2. Théorie sur les phénomènes d'évolution du DPS

Les charges peuvent se déplacer le long de la surface du diélectrique, permettant une dissipation progressive. Le potentiel surfacique décroît généralement en fonction du temps, ce qui peut être mesuré pour évaluer la performance du diélectrique. Dans certains cas, les ions peuvent s'évaporer de la surface, ce qui contribue également à la dissipation. On peut observer une polarisation dipolaire, alignant les dipôles pour compenser la charge. Les charges se déplacent sur une distance moléculaire, chaque molécule agissant comme un dipôle. La polarisation peut aussi être inter faciale, avec le déplacement des charges vers les deux faces.

La conduction surfacique, notamment dans les polymères épais et vieilliss, constitue une autre cause de déclin du potentiel. Les charges se déplacent le long des couches superficielles, principalement en dehors de conditions spécifiques d'activation. Pour les films minces ou cristaux, les phénomènes piézoélectriques peuvent contribuer à l'évolution du potentiel, générant un effet piézoélectrique sous pression.

L'air contient des ions et des électrons générés par l'ionisation, les charges positives et négatives peuvent se recombinaer avec les porteurs libres, ce qui réduit ou élimine la charge en surface. Elles peuvent aussi pénétrer dans le volume, déclenchant un phénomène d'injection. Ces phénomènes interagissent simultanément, nécessitant une prise en compte complète pour comprendre cette décroissance. Selon la bibliographie, trois principaux mécanismes sont souvent cités.

Selon Ieda, Sawa et Shinohara en 1969, lorsque des électrons ou des ions se déplacent à travers le volume du matériau, souvent en raison de la présence de défauts ou de dopants. Cela fait référence à la conduction des charges à l'intérieur du matériau lui-même. L'apparition du phénomène « cross-over » valide ce mécanisme.

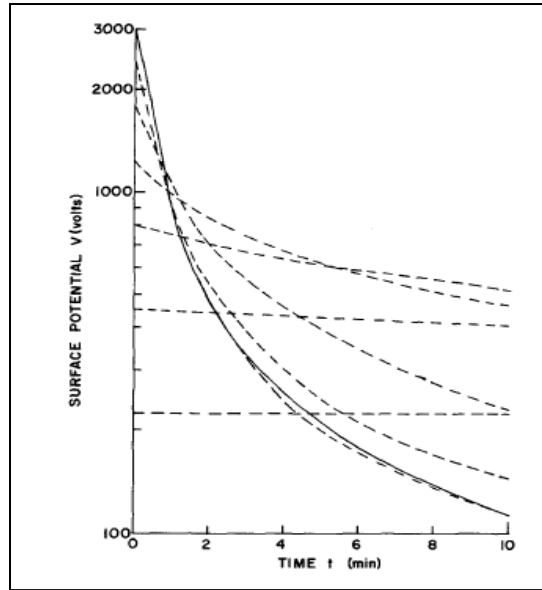


Figure II. 1 : Déclins de potentiels de surface pour des échantillons de polyéthylène illustrant l'effet du « crossover » [78].

Le phénomène de **cross-over** dans le contexte des matériaux diélectriques et des isolants se réfère généralement à un changement de comportement électrique, souvent lié à des variations de température, de fréquence ou de champ électrique [79]. Le cross-over se produit lorsque le mécanisme dominant de conduction est l'injection. Batra et Hall [80] ont développé un modèle de déclin du potentiel intégrant une injection partielle de charges, montrant une diminution initiale graduelle du potentiel lorsque l'injection de surface est instantanée. Le taux initial de décroissance est sensible au processus d'injection, augmentant proportionnellement aux valeurs initiales du potentiel. Le modèle de Sonnonstine et Perlman [81], destiné à décrire l'évolution des charges a associé le phénomène de cross-over à une mobilité et une efficacité d'injection dépendantes du champ électrique, ainsi qu'à une injection temporellement dépendante.

D'autres modèles, comme celui de Von Berlepsh [79], reposent sur le transport de charges dans volume du matériau sous forme de déplacement entre pièges profonds et peu profonds. Les expériences de Baum et Hall [82] soulignent l'impact des photons et des espèces neutres excitées générées par la décharge couronne sur l'injection de charges qui est significatif et peut être analysé sous plusieurs angles. Perlman et Hall [83] ont observé que les espèces neutres excitées, comme les atomes ou molécules d'air excité, peuvent interagir avec la surface du matériau, influençant la distribution des charges et leur injection. Ces espèces peuvent également former des radicaux libres qui peuvent modifier les propriétés de surface du matériau. La présence de porteurs supplémentaires (électrons et ions) favorise l'injection de charges dans le matériau.

Baum et Hall expliquent que Les photons émis par la décharge couronne peuvent ioniser les molécules d'air, créant des paires d'électrons et d'ions. Cela augmente le nombre de porteurs de charge dans l'environnement, facilitant l'injection de charges sur les surfaces des isolants. Les

photons d'énergie suffisante peuvent également exciter les électrons dans le matériau, contribuant à la conduction. Les charges injectées peuvent également influencer la polarisation du matériau, modifiant son comportement électrique [84,85].

Les travaux de Dascalescu et Hall sur des granules de PVC et de PE ont montré que la cinétique des charges dépend fortement de l'air ambiant, le DPS augmente en fonction de l'augmentation de l'humidité [86]. De la même manière, Ramadnia et Hall ont réalisé des travaux de DPS sur des granules de polystyrène (HIPS) à différentes épaisseurs, ils ont relevé que plus le potentiel de la grille croît le DPS croît, par contre, si on augmente l'épaisseur des granules le DPS diminue [87].

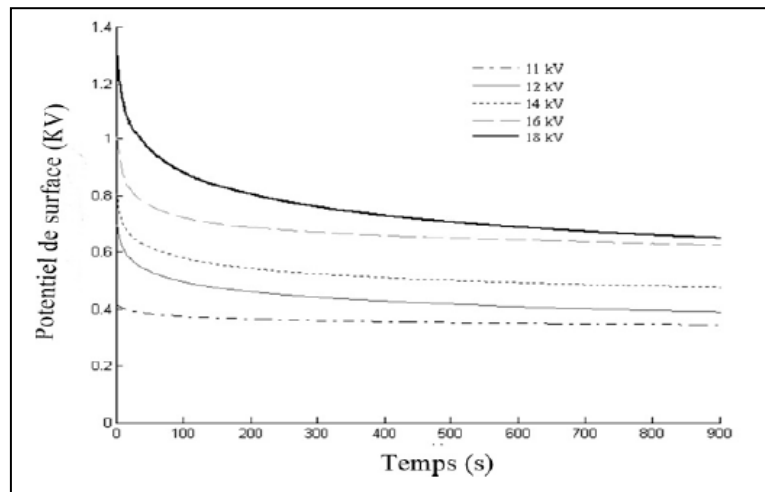


Figure II.2 : Courbes de DPS obtenues pour plusieurs valeurs de tension de décharge positive [85].

Herous et Hall [88] ont développé une approche intéressante sur l'évolution des charges statiques sur du PET. Leurs travaux sont orientés beaucoup plus sur l'effet de la température et de l'humidité sur le DPS. Ils ont observé qu'à des températures plus élevées, la mobilité des charges dans le matériau augmente, ce qui peut favoriser la dissipation des charges accumulées. L'augmentation de la température peut améliorer la conduction de surface et de volume, ce qui entraîne un déclin plus rapide du potentiel, figure II.3.

De plus, les travaux de Lovera et Molinie [73] ont démontré qu'à une température allant de 10°C à 80°C le DPS était principalement gouverné par une injection de charge associée d'une conduction ionique, pour cela, ils ont utilisé pour la première fois la représentation  $tdV/dt$  en fonction de  $\log(t)$ .

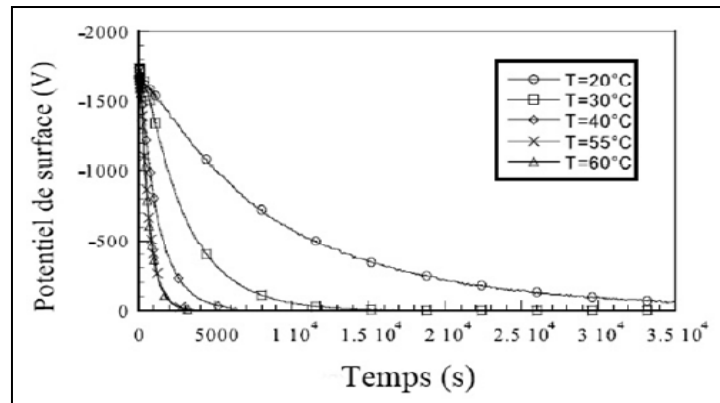


Figure II.3 : Déclin du potentiel de surface pour différentes valeurs de température [88].

### II.3. La polarisation

La polarisation se réfère au déplacement des charges à l'intérieur d'un matériau lorsque celui-ci est soumis à un champ électrique. Cela peut créer des dipôles électriques, affectant les propriétés électriques du matériau. Si les dipôles existent déjà, le champ peut les aligner dans une seule direction. La notion de polarisabilité  $\alpha$ , caractérise la capacité d'une molécule ou d'un atome à se polariser sous l'effet d'un champ électrique externe. Elle quantifie le déplacement des charges dans la structure du dipôle.

Néanmoins, ces grandeurs microscopiques sont difficiles à mesurer. Il est préférable d'utiliser la polarisation  $\vec{P}$ .

Soit  $N$  le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume et  $\vec{p}$  le vecteur moment dipolaire (une grandeur microscopique), la polarisation  $\vec{P}$ , est définie par la relation :

$$\vec{P} = N\vec{p} \quad (\text{II. 1})$$

L'unité de la polarisation est le Coulomb.m<sup>-2</sup>.

Différents types de polarisation peuvent être observées (Figure. II.4) :

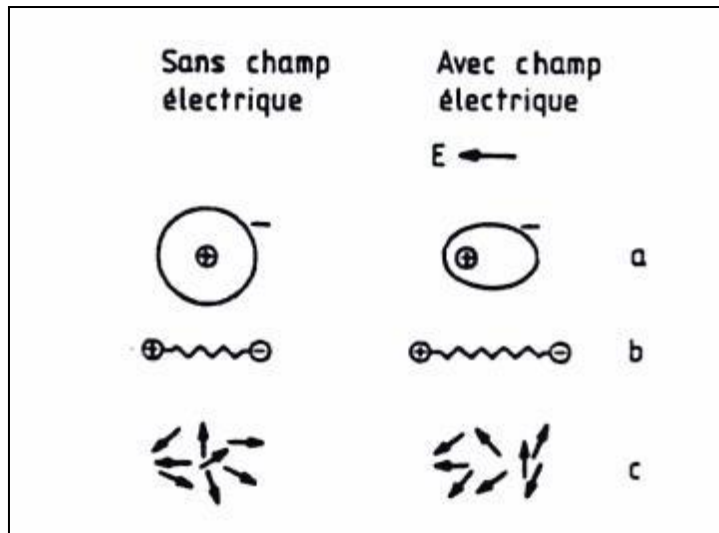


Figure.II.4 : Représentation schématique de trois types de polarisation :  
 (a) électronique (b) atomique (c) d'orientation [88].

## II.4. La polarisation et le déclin de potentiel

La permittivité relative ( $\epsilon$ ) est une expression clé de la polarisation dans les diélectriques. Elle se réfère au déplacement des charges dans un matériau diélectrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Cela crée des dipôles électriques qui contribuent à la réponse du matériau au champ appliqué.

La constante diélectrique peut varier avec la fréquence du champ électrique appliqué. Par exemple, à haute fréquence, les contributions à la polarisation dues à des mouvements de charge peuvent être différentes de celles à basse fréquence. Elle peut changer avec la température, affectant les propriétés de polarisation et la mobilité des charges dans le matériau. De plus, pour des champs électriques élevés, la réponse du matériau peut devenir non linéaire, ce qui signifie que la permittivité effective peut varier en fonction de l'intensité du champ. En somme, la réponse des matériaux diélectriques est influencée par divers facteurs, rendant la caractérisation de leur comportement complexe. La polarisation  $P$ , est généralement considérée proportionnelle au champ électrique. Elle est fonction à la permittivité relative ( $\epsilon$ ) et du vide ( $\epsilon_0$ ) par la relation suivante :

$$\vec{P} = (\epsilon - \epsilon_0)\vec{E} \quad (\text{II. 2})$$

On observe aussi une relation commune entre la polarisation, le champ local  $\vec{E}_l$ , la concentration moléculaire  $N$  et la polarisabilité globale  $\alpha$ , rapportée à la molécule :

$$\vec{P} = N\alpha\vec{E}_l \quad (\text{II. 3})$$

La polarisabilité totale  $\alpha$  englobe les polarisabilités électronique  $\alpha_e$ , ionique  $\alpha_i$ , et d'orientation  $\alpha_0$ . Sur la figure II.5, la relation entre la polarisation molaire et la fréquence. Il est très clair selon la figure la polarisation en fonction du champ [73, 89, 90, 91].

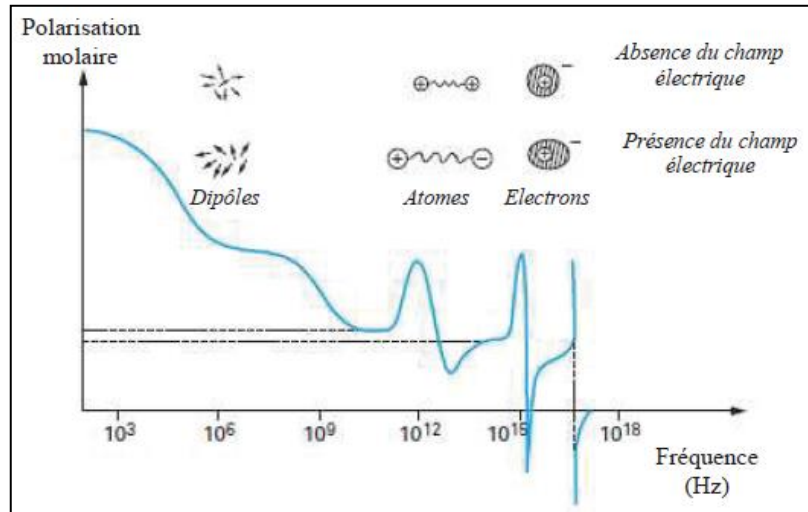


Figure II.5 : Evolution de la polarisation molaire en fonction de la fréquence du champ appliqué. [73].

La polarisation d'orientation est un type de polarisation qui se produit dans les matériaux diélectriques lorsque des molécules polaires s'alignent sous l'influence d'un champ électrique. Lorsque le champ varie lentement pour permettre aux dipôles de s'aligner avec le champ, la permittivité prend une valeur influencée par les polarisabilités électronique  $\alpha_e$  et ionique  $\alpha_i$ , sans une orientation rapide.

#### II.4.1. La fonction réponse diélectrique

La polarisation d'un matériau diélectrique en réponse à une variation du champ électrique  $E(t)$  peut présenter un délai, qui dépend de la nature du matériau isolant. Lorsqu'un champ électrique est appliqué ou modifié, le matériau ne réagit pas instantanément. La polarisation prend un certain temps pour s'établir, ce qui est connu sous le nom de temps de relaxation. De plus, Différents matériaux ont des structures moléculaires et des propriétés physiques qui influencent leur capacité à polariser. Par exemple, les matériaux ayant des dipôles permanents peuvent réagir différemment de ceux qui dépendent de la polarisation induite [73, 89, 90].

Considérons maintenant une brève impulsion de champ électrique  $E$  appliquée pendant une courte période  $\Delta(t)$ . Dans ce cas, la  $f(t)$  sera :

$$P(t) = \epsilon_0 E \cdot \Delta t \cdot f(t) \quad (\text{II.4})$$

En raison de l'absence de polarisation permanente, la fonction tend vers zéro avec l'augmentation du temps. Conformément au principe de causalité, aucune réaction ne peut précéder l'action :

$$f(t) \equiv 0 \text{ pour } t < 0 \quad (\text{II. 5})$$

Cela suggère que tout champ électrique avec une variation arbitraire  $E(t)$ , peut être décomposé en impulsions. En appliquant le théorème de superposition, il devient possible de sommer les polarisations associées à chaque impulsion, exprimant ainsi la polarisation par le biais de la convolution suivante :

$$P(t) = \varepsilon_0 \int_0^{\infty} E(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (\text{II. 6})$$

#### II.4.2. Déclin de potentiel par polarisation diélectrique

Si le matériau conserve sa linéarité et son homogénéité à l'échelle macroscopique. La relaxation diélectrique d'un isolant fait référence au délai nécessaire pour que le matériau atteigne un nouvel état d'équilibre après une variation du champ électrique. C'est le processus par lequel les dipôles moléculaires d'un matériau s'alignent et se stabilisent en réponse à un champ électrique appliqué. Cette réponse n'est pas instantanée et se produit sur une échelle de temps caractéristique. On peut les représenter par les fonctions suivantes  $\Phi_D(t)$  et  $\Phi_E(t)$  [90, 81, 92, 64]

$$D(t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t E(\tau) \Phi_D(t - \tau) d\tau \quad (\text{II. 7. a})$$

$$E(t) = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_{-\infty}^t D(\tau) \Phi_E(t - \tau) d\tau \quad (\text{II. 7. b})$$

Pour un isolant non hétérogène avec une épaisseur  $e$ , sans charge d'espace, et avec une charge uniquement à la surface  $\sigma_s$ , le champ électrique à l'intérieur reste inchangé. Dans ce cas, le potentiel peut être établi en utilisant un produit de convolution :

$$V(t) = \frac{e}{\varepsilon_0} \int_{-\infty}^t \sigma_s(\tau) \Phi_E(t - \tau) d\tau \quad (\text{II. 8})$$

Si on observe une perte d'une charge bien définie dans ce cas, il est possible de la préciser par échelon d'amplitude  $q_0$ . Par conséquent, en appliquant la transformation de Laplace, l'expression II.8 sera comme suit :

$$V(p) = \frac{e}{\varepsilon_0 S p} q_0 \Phi_E(p) \quad (\text{II. 9})$$

D'où :

$$pV(p) = \frac{eq_0}{\epsilon_0 S} \phi_E(p) \quad (\text{II. 10})$$

La partie gauche de l'équation II.10 correspond à la dérivée du potentiel dans le domaine temps. Dans ce cas, le potentiel de surface décroît sous l'influence d'une polarisation lente à la vitesse suivante :

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{eq_0}{\epsilon_0 S} \phi_E(t) \quad (\text{II. 11})$$

Une analogie peut être observée entre le courant et la tension. En effet, l'évolution du courant montre une certaine proportionnalité avec la dérivée du potentiel ( $dV/dt$ ). Pour une meilleure représentation graphique, on utilise généralement des coordonnées logarithmiques. La dérivée du potentiel en  $\log(dV/dt)$  et l'axe du temps en  $\log(t)$ . Selon les travaux de Jonscher, on peut observer deux asymptotes différentes dans ce cas, la réponse est définie par une loi empirique. Dans le cas où on observe une seule pente, dans ce cas on suppose une loi empirique de Curie-Von Schweidler [75, 91, 92, 94, 95].

### II.4.3. Polarisation par charge d'espace

La polarisation peut également résulter des charges emprisonnées à l'intérieur du volume et/ou aux interfaces, dénommée dans ce contexte la polarisation par charge d'espace. Cette configuration est particulièrement observée dans les solides amorphes ou polycristallins [89]. Coelho a formulé une approche asymptotique pour examiner le déclin de potentiel issu de la polarisation par charges d'espace [91]. On considère que le champ électrique extérieur est négligeable, relevé par la sonde. À des durées prolongées, lorsque la distribution de charge devient presque uniforme, la solution asymptotique du potentiel suit une loi en  $t^{-1}$ .

## II.5. Conductions dans les isolants

Les matériaux isolants se démarquent par leur conductivité très basse, bien que sous l'influence d'un champ électrique intense, un flux de courant puisse souvent être observé. La classification des matériaux en isolants et conducteurs est définie par énergie de Fermi. L'énergie de Fermi  $E_F$  est le niveau d'énergie le plus élevé occupé par des électrons dans un métal à zéro Kelvin (0 K). Elle est un paramètre crucial pour comprendre les propriétés électroniques des matériaux. La probabilité  $P$  qu'un électron occupe un niveau d'énergie  $E$  dans un système de fermions (comme les électrons) à température  $T$  est donnée par la formule suivante :

$$P(E, T) = \left[ 1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kBT}\right) \right]^{-1} \quad (\text{II. 12})$$

Où

- $k_B$  la constante de Boltzmann
- $E_f$  le niveau d'énergie de Fermi.

La figure II.6. représente la distribution de Fermi et la bande d'énergie.

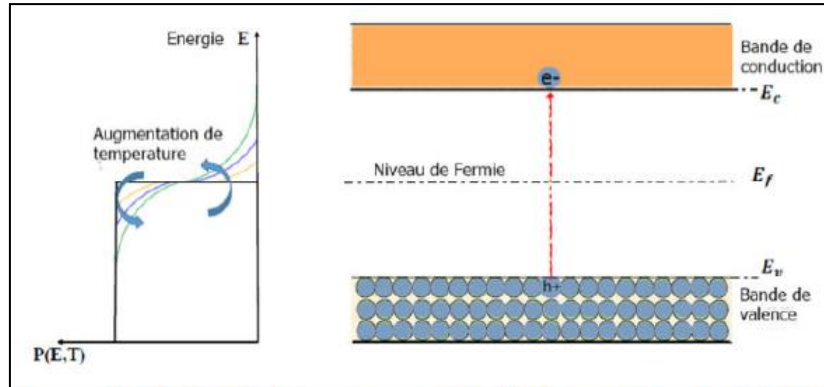


Figure II.6 : Diagramme de bande d'énergie. A gauche du diagramme, une représentation de la distribution de Fermi-Dirac indiquant la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie en fonction de la température.

Les bandes d'énergie sont des concepts fondamentaux en physique des matériaux, surtout en ce qui concerne la conduction électrique et les propriétés électroniques des solides, figure II.7. Les niveaux d'énergie des électrons dans un solide ne sont pas discrets mais forment des "bandes" d'énergie. Entre ces bandes, il existe des zones interdites (bandes interdites) où les électrons ne peuvent pas exister. Les électrons de la bande de valence peuvent facilement se déplacer vers la bande de conduction (ex. : métaux). Il n'y a pas de bande interdite ou elle est très faible. Les semi-conducteurs ont une bande interdite relativement étroite (généralement  $< 2$  eV). À température ambiante, certains électrons peuvent être excités de la bande de valence à la bande de conduction. Les isolants possèdent une bande interdite large (généralement  $> 2$  eV), rendant difficile l'excitation des électrons vers la bande de conduction [97].

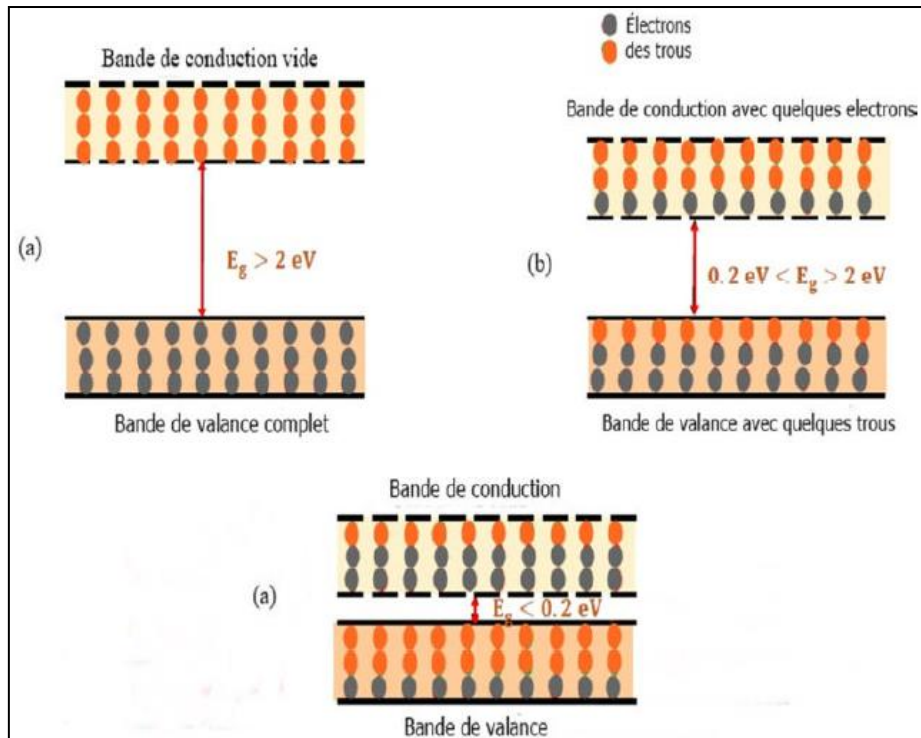


Figure II.7 : Diagramme de la bande d'énergie des matériaux dans les trois situations ; (a) un isolant, (b) un semi-conducteur et (c) un conducteur [96].

Lorsque deux matériaux avec des niveaux de Fermi distincts sont mis en contact, un phénomène intéressant se produit, connu sous le nom de retrait de Fermi ou équilibre de Fermi. Chaque matériau a son propre niveau de Fermi, qui représente l'énergie maximale occupée par les électrons à température nulle. Si deux matériaux (par exemple, un métal et un semi-conducteur) ont des niveaux de Fermi différents, cela crée un déséquilibre. Les électrons du matériau ayant un niveau de Fermi plus élevé (plus d'énergie) vont se diffuser vers le matériau ayant un niveau de Fermi plus bas jusqu'à atteindre un équilibre. Ce mouvement des charges crée une région de charge à l'interface, ce qui génère une barrière de potentiel. Cela influence la conduction dans l'interface. [102].

D'autre part, dans un conducteur ou un semi-conducteur, les charges libres (électrons dans les conducteurs, électrons et trous dans les semi-conducteurs) sont responsables de la conduction électrique. La présence de charges libres dans le volume du matériau est essentielle pour permettre le transport d'électricité. La capacité des charges à se déplacer dans le volume dépend de la structure du matériau, de sa température, et de la présence de défauts ou d'impuretés [100]. Ces mécanismes sont représentés sur la Figure II.8. En général, on peut observer plusieurs mécanismes seulement un seul prédomine.

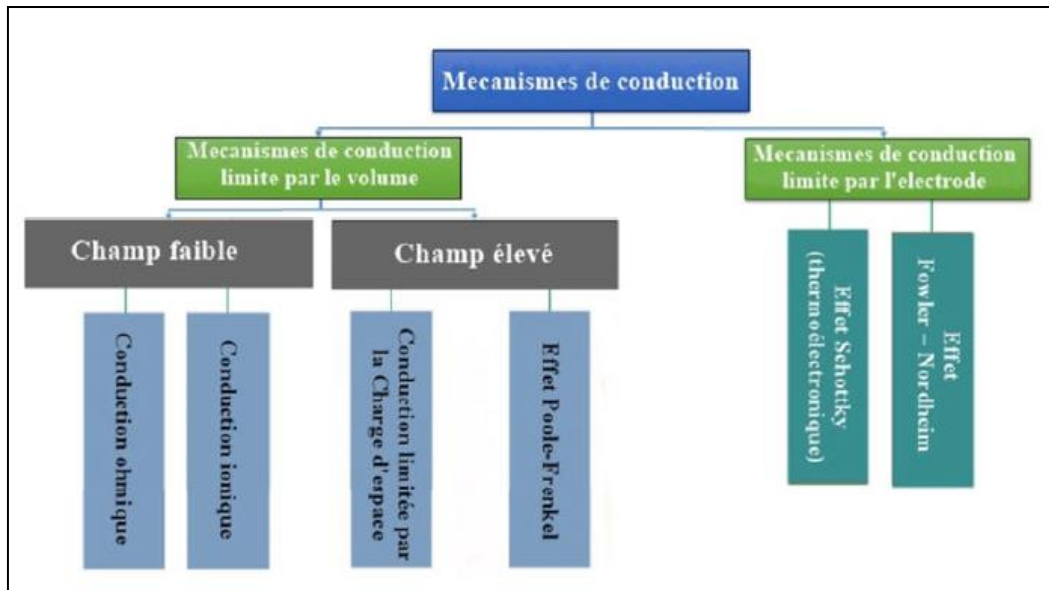


Figure II.8 : Classification des mécanismes de conduction dans un matériau diélectrique [96].

## II.6. Mécanismes d'injection de charges dans l'isolant

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un isolant, il peut provoquer le déplacement d'électrons ou d'ions dans le matériau. Dans certains cas, des électrons peuvent être injectés dans la bande de conduction de l'isolant si l'énergie fournie par le champ est suffisante pour surmonter la bande interdite. La figure II.9 présente un schéma de l'interface entre l'électrode et l'isolant. La hauteur de la barrière est représentée par  $\Phi_0$ .

La valeur de cette barrière peut empêcher le passage des électrons du métal vers l'isolant. La hauteur de cette barrière dépend de la différence entre le niveau de Fermi du métal et le niveau d'énergie des électrons dans l'isolant.

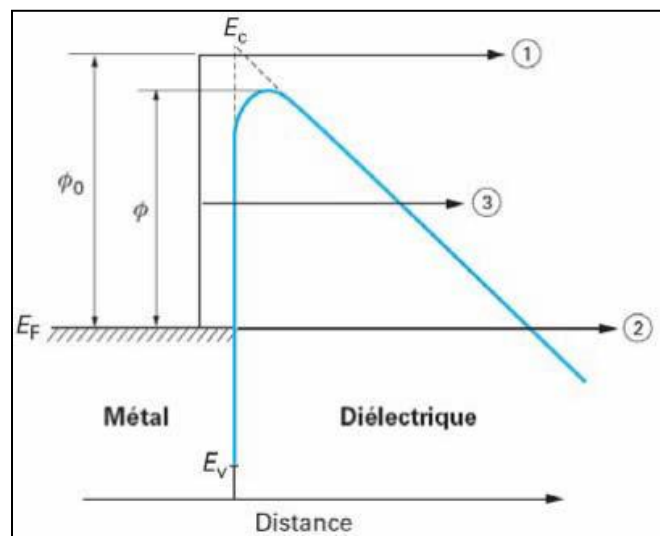


Figure II.9 : Allures des courants d'absorption et de résorption [46].

Le champ électrique confère aux charges injectées (comme des électrons) une énergie supplémentaire qui peut réduire la hauteur de la barrière de potentiel à l'interface entre l'électrode et l'isolant cela facilite le passage des électrons du métal vers l'isolant ou vice versa. Ces mécanismes sont représentés sur la figure II.9.

### II.6.1. Effet Schottky

L'effet Schottky fait référence à la formation d'une barrière de potentiel à l'interface entre un métal et un semi-conducteur ou un isolant, influençant le transport des charges. Lorsque le métal et le semi-conducteur sont en contact, les niveaux de Fermi s'alignent, entraînant la formation d'une barrière de potentiel au niveau de l'interface. Cette barrière est généralement plus faible que la barrière de potentiel typique dans un diodique P-N, permettant un certain passage d'électrons, figure II.9. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les électrons peuvent être injectés depuis le métal vers le semi-conducteur, en surmontant la barrière. L'application d'un champ électrique réduit la hauteur de la barrière, facilitant l'injection des électrons.

$$\phi = \phi_0 - \beta_S \sqrt{E} \quad (\text{II. 13})$$

Avec  $\beta_S$  est la constante de Schottky, est calculée selon l'équation :

$$\beta_S = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}} \quad (\text{II. 14})$$

La densité de courant sera :

$$J = AT^2 \exp\left[\frac{\phi_0 - \beta_S \sqrt{E}}{KT}\right] \quad (\text{II. 15})$$

Dans cette équation,  $A$  est la constante de Richardson – Schottky et vaut  $120 \text{ A.cm}^{-2}$ .

### II.6.2. Effet Fowler – Nordheim

En situation de champ électrique intense, les électrons peuvent acquérir l'énergie nécessaire pour être injectés depuis la surface d'un matériau. Le travail de sortie représente l'énergie requise pour extraire un électron de la surface du matériau. Au-delà de  $10^8 \text{ V/m}$ , la valeur du courant prédit par Schottky (basée sur l'émission thermique d'électrons) reste faible.

Cependant, les observations expérimentales révèlent des courants mesurables dans ces conditions. Fowler et Nordheim ont proposé une explication à ce phénomène. En présence d'un fort champ électrique, les électrons resteront en surface. Au lieu de cela, en raison de leur nature ondulatoire, ils peuvent traverser la barrière par effet tunnel.

L'effet du rayon de courbure est également crucial, car les champs électriques peuvent être considérablement renforcés sur les surfaces.

Enfin, la présence de particules de poussière sur les surfaces peut également jouer un rôle majeur dans la formation de champs électriques locaux très intenses.

Tous ces mécanismes expliquent pourquoi, malgré des champs électriques élevés, les courants mesurables peuvent être obtenus, et pourquoi la conduction par effet tunnel peut être significative dans certaines conditions et configurations spécifiques.

Fowler et Nordheim ont proposé une expression pour la densité de courant dans le phénomène d'émission par effet tunnel, généralement appelée "émission de Fowler-Nordheim". Cette expression sera comme suit :

$$J_{FN} = A_{FN}(E_C)^2 \exp\left(-\frac{\beta_{FN}}{E_C}\right) \quad (\text{II. 16})$$

Où  $E_C$  est le champ électrique réel à la cathode en kV/mm.

$A_{FN} = \frac{q^3}{8\pi h\phi}$  est une constante où  $q$  est la charge élémentaire  $\approx 1.602 \cdot 10^{-19}$  C.

$h$  est la constante de Planck  $\approx 6.626 \cdot 10^{-34}$  J.s.

$\Phi$  est le travail de sortie.

$B_{FN} = \frac{\sqrt[4]{2m\phi^{3/2}}}{3hq}$  est une constante où  $m$  est la masse effective de l'électron.

## II.7. Conduction en volume

La structure désordonnée des polymères rend complexe la compréhension microscopique de leurs propriétés conductrices. Pour qu'un polymère soit intrinsèquement conducteur, il faut qu'il existe en son sein des porteurs et que ceux-ci soient délocalisés.

Généralement, à cause de la valeur élevée du gap, les porteurs des charges intrinsèques sont en densité, extrêmement faibles dans un polymère. L'existence d'une telle conduction a fait l'objet de beaucoup de controverse [104].

### II.7.1. Considérations générales (isolant homogène)

Si un matériau isolant contient des porteurs de charges mobiles et soumis à un champ électrique d'intensité  $E$  (figure II.10).

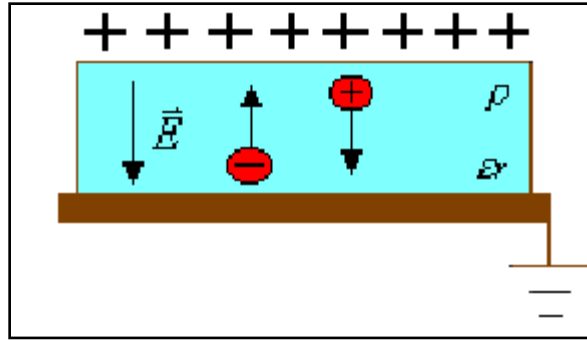


Figure II.10 : Matériau isolant avec des charges mobiles et soumis à un champ électrique [103].

La conduction ohmique est caractérisée par la densité du courant volumique  $J_v$  ( $\text{Am}^{-2}$ ) :

$$\vec{J}_V = \sigma_v \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho_v} = \left[ \sum \mu_i n_i \right] \vec{E} \quad (\text{II. 17})$$

$$\rho_v = \frac{1}{\sigma_v} : \text{Résistivité volumique } (\Omega\text{-m})$$

La conductivité est fonction de la densité et de la mobilité des porteurs de charges. Soit une densité superficielle de charges  $\delta_s$  ( $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ ) l'équation de continuité entre les faces de l'air et de l'isolant devient :

$$\delta_s = \frac{\epsilon \cdot V}{L} \quad (\text{II. 18})$$

$$\frac{\partial \delta_s}{\partial t} = -J_v \quad (\text{II. 19})$$

D'ou  $\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\sigma_v}{\epsilon} V$

On obtient :

$$V(t) = V_0 \exp \left[ -\frac{\sigma_v}{\epsilon} t \right] \quad (\text{II. 20})$$

La solution de cette équation est bien sûr une exponentielle où  $V_0$  représente la tension avant le déclin.

C'est le plus simple modèle du DPS d'un matériau polymère chargé par effet couronne. Du moment que le déclin s'effectue par le volume implique une résistivité volumique  $\rho_v$  du matériau,

d'où une résistance R. on peut donc considérer ce matériau comme un condensateur C en parallèle avec une résistance R, figure II.11.

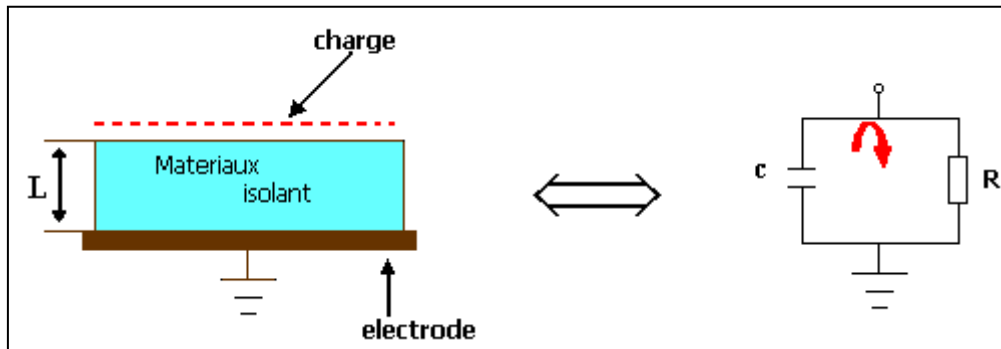


Figure II.11 : Modèle élémentaire du déclin de potentiel (RC) [33].

La décharge de C à travers R

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\sigma_v}{\varepsilon} V \quad (II.21)$$

Où

$\sigma_v$  : Conductivité volumique.

$$V(L, t) = V(L, 0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (II.22)$$

Le potentiel de surface décroît de manière exponentielle.

La constante  $\tau = RC$  peut être déterminée comme suit :

$$\tau = RC = \left(\frac{\rho_v}{S} L\right) \times \left(\frac{\varepsilon \cdot S}{L}\right) = \rho_v \times \varepsilon \quad (II.23)$$

On peut dire que le matériau se comporte comme un condensateur se déchargeant à travers une résistance avec une constante de temps :  $\tau = \rho_v \cdot \varepsilon$

La conduction est donc contrôlée par  $\rho_v \cdot \varepsilon$  (permittivité diélectrique et conductivité volumique  $\sigma_v = 1/\rho_v$ ).

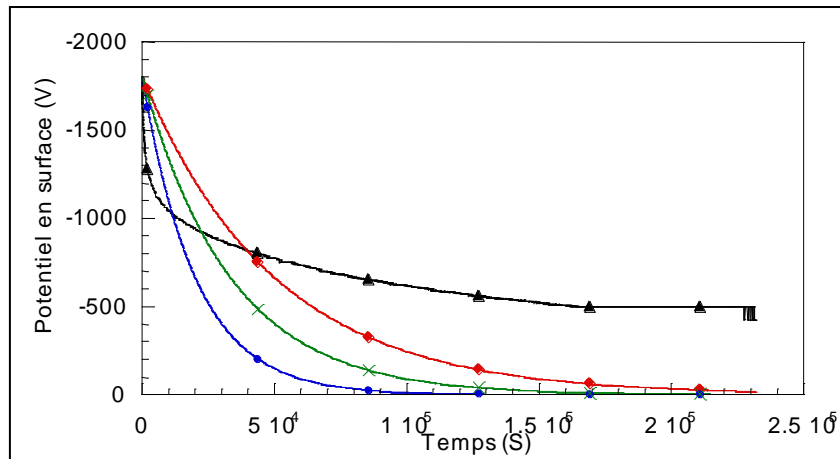


Figure II.12 : Comparaison du modèle RC avec des données expérimentales échantillon  $e = 1 \text{ mm}$  ;  $RH = 50\%$  ;  $T^\circ = 60^\circ\text{C}$  ;  $V = -1800\text{V}$   
 $\blacktriangle$  : Essai expérimental ; Modèle RC :  $\bullet$  :  $\sigma_v = 5.10^{-7}$  ;  
 $\times$  :  $\sigma_v = 3.10^{-7}$  ;  $\blacklozenge$  :  $\sigma_v = 2.10^{-7} (\Omega^{-1}\text{m}^{-1})$  [87].

Dans la figure II.12, Herous et al [87], ont essayé d'ajuster une courbe de déclin par un modèle RC.

En pratique, les graphiques illustrant la décroissance du potentiel en surface s'écartent de la forme exponentielle, sauf dans certaines situations où la conductivité en surface prédomine nettement et se comporte de manière linéaire selon la loi d'Ohm.

Toutefois, la conductivité dépend généralement du champ électrique ainsi que d'autres grandeurs d'activation, ce qui implique que le modèle de conductivité constante n'est généralement pas applicable.

Les polymères bien que performants dans leur fonction isolation, ne sont pas exempts de défauts. Leur topologie est très éloignée de celle d'un isolant parfait. Il existe des irrégularités au niveau moléculaire qui introduisent du désordre dans la périodicité du réseau ou de la structure du cristal qui constitue des défauts. Les défauts rencontrés ont des provenances diverses. Il est donc judicieux de les séparer en deux catégories : ceux d'ordre topologiques et ceux provenant des sources chimiques.

Les défauts d'ordre topologiques sont liés à la position relativement aléatoire des atomes et des molécules. Ces défauts résultent principalement des formes variées que peuvent adopter les chaînes polymères, notamment en raison de la présence de groupes latéraux volumineux et polaires, figure II.13.

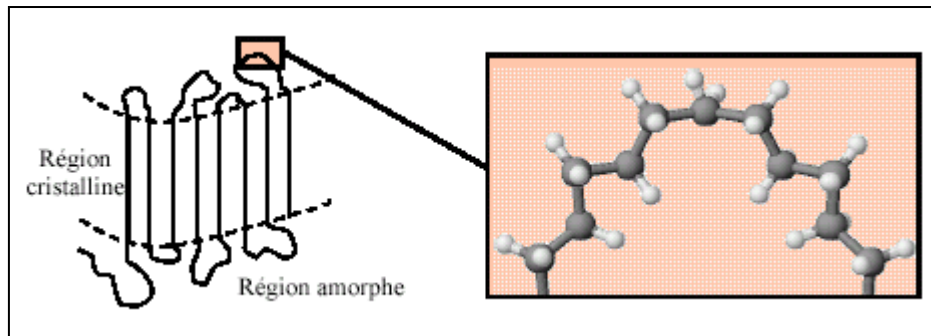


Figure II.13 : Défauts d'ordre topologique [103].

Les défauts d'ordre chimique sont liés à des malformations du polymère ou à la présence de résidus. Ces anomalies se produisent principalement lors du processus de fabrication. En outre, les polymères peuvent contenir des résidus et des additifs. En fait, un simple processus de réticulation entraîne la formation de nombreux résidus. De plus, les isolants contiennent des additifs ; le principal étant bien sûr l'antioxydant. Il arrive aussi que ces impuretés et ces additifs se dégradent avec le temps et forment d'autres corps.

## II.8. Mesure par sonde à condensateur vibrant

La sonde de condensateur vibrant est un dispositif utilisé principalement pour mesurer des propriétés électriques, souvent dans le contexte de la caractérisation de matériaux ou de la détection de défauts. Elle permet des mesures sans contact direct avec le matériau, réduisant ainsi les risques de contamination. En utilisant un courant alternatif, cette sonde surmonte les variations inhérentes à la sonde à induction en convertissant préalablement les tensions ou courants continus à mesurer en tensions alternatives. Ce processus permet l'utilisation d'amplificateurs classiques avec des couplages capacitifs ou inductifs sans dérives.

Théoriquement, le condensateur de conversion peut adopter une forme rotative ou résonante. Bien que le taux de conversion de la sonde à condensateur vibrant soit modeste, elle représente une option attrayante en raison de son absence d'usure et de nécessité d'entretien. Contrairement à d'autres méthodes, la sonde à condensateur vibrant n'exige pas de contact coulissant avec l'armature mobile [104, 105, 106, 107].

Pour effectuer cette conversion, une méthode courante est la modulation par variation de capacité. C'est un dispositif utilisé pour mesurer des propriétés électrostatiques, souvent dans le contexte de la détection de champs électriques ou de la caractérisation de matériaux. La sonde utilise un élément vibrant, souvent un diaphragme ou un fil, qui oscille à une fréquence spécifique. Lorsque la sonde vibre dans un champ électrique, les forces électrostatiques agissent sur l'élément vibrant. La vibration modifie la distance entre les électrodes, ce qui change la capacitance. Cette variation peut être mesurée et liée à l'intensité du champ électrique figure II.14.

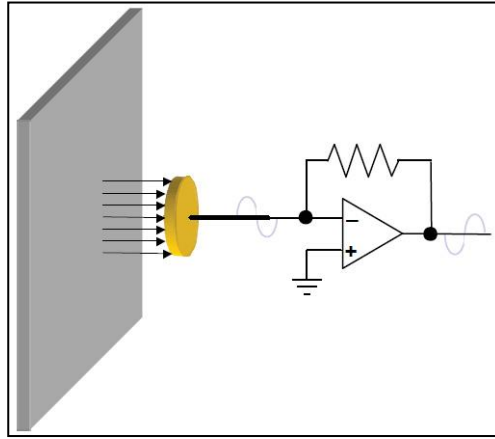


Figure II.14 : Principe de modulation par variation de capacité [103].

Lorsque la sonde vibre, des variations de distance entre les électrodes se produisent, ce qui affecte la capacité. Le signal mesuré est donc l'intensité du courant électrique résultant des forces électrostatiques agissant sur l'élément vibrant due à la variation du potentiel de surface  $V_s$  entre la sonde et l'échantillon [104, 108].

$$i = c \frac{dV_s}{dt} + V_s \frac{dC}{dt} \quad (II.24)$$

$C$  caractérise la capacité définie par la sonde et le matériau. En cas de modulation sinusoïdale, cette capacité correspond à (II.25),

Où

$C_0$  représente la capacité moyenne et  $C_1$  l'amplitude des variations.

$$C = C_0 + C_1 \sin(\omega t) \quad (II.25)$$

Lorsque la différence de potentiel  $V_s$  ne varie pas, (II.24), devient :

$$i = V_s \frac{dC}{dt} \quad (II.26)$$

La mesure de  $V_s$  implique de détecter le potentiel électrique à la surface d'un matériau. Pour obtenir une mesure précise, le système vise à maintenir le courant induit à zéro, ce qui indique que les forces électrostatiques sont équilibrées. Un système de rétroaction électronique ajuste continuellement les conditions (comme le champ électrique appliqué) pour compenser les variations de potentiel. En ajustant le courant à zéro, le système annule le champ électrostatique au point de mesure, permettant une évaluation précise de  $V_s$ .

$$i = (V_s - V_m) \frac{dC}{dt} = 0 \quad (II.27)$$

Considérons les deux scénarios (figure ci-dessous), où une sonde à condensateur vibrant est utilisée. Dans le cas (a), l'électrode cible est maintenue à un potentiel  $V_2$ , entraînant la production d'un signal  $V_1$  par les vibrations de la sonde, dont la direction est sélectionnée de manière arbitraire. Toutefois, dans le cas (b), lorsque la sonde est à un potentiel  $V_m$ , le signal généré affiche une orientation opposée à celle du scénario (a). Lorsque cette sonde est employée pour relever le potentiel d'un échantillon, le système règle le potentiel de la sonde  $V_m$  pour qu'il soit égal au potentiel de surface de l'échantillon  $V_s$ .

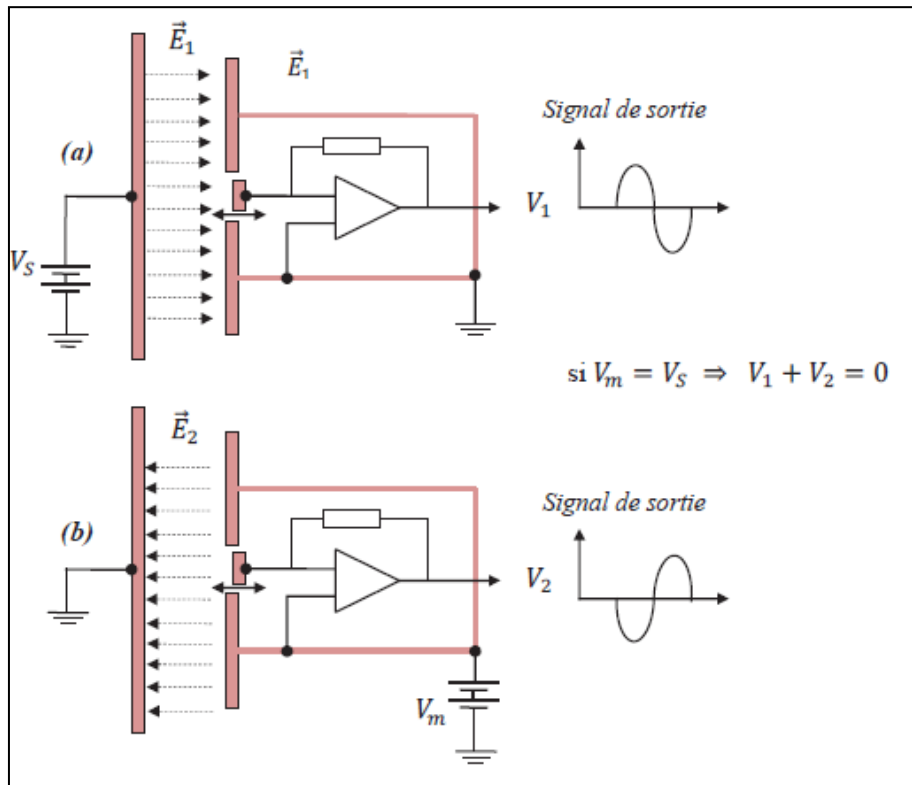
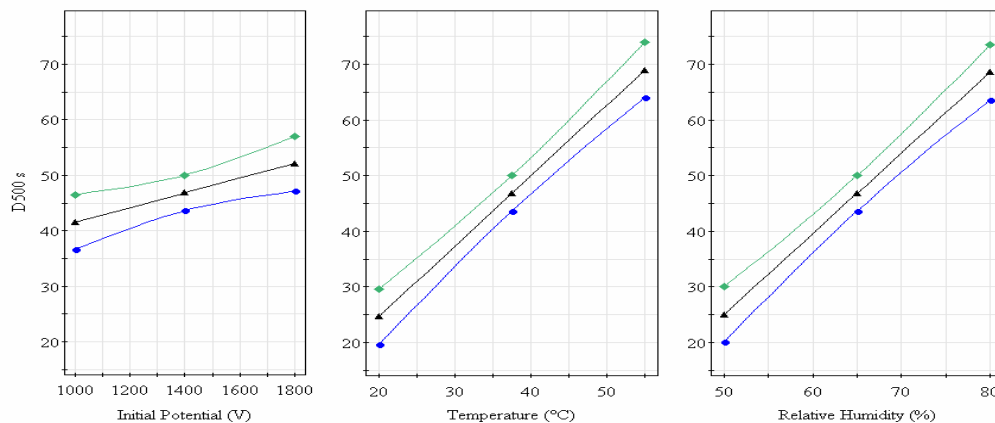


Figure II.15 : Principe de mesure du potentiel de surface à l'aide de la sonde à condensateur vibrant [104].

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés sur le DPS notamment le travail de Herous qui a démontré les avantages de la méthode de modélisation expérimentale figure II.16.



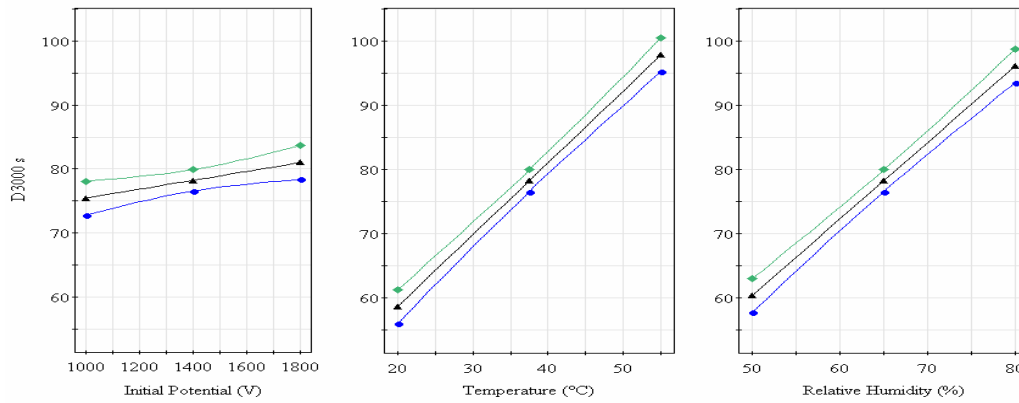


Figure II.16 : Relevés graphiques des taux prédits du déclin de potentiel en surface à court terme  $D_{500s}$  (a) et à long terme  $D_{3000s}$  (b) en fonction de : potentiel initial  $V_0$ , Température  $\theta$  et l'Humidité Relative HR [87].

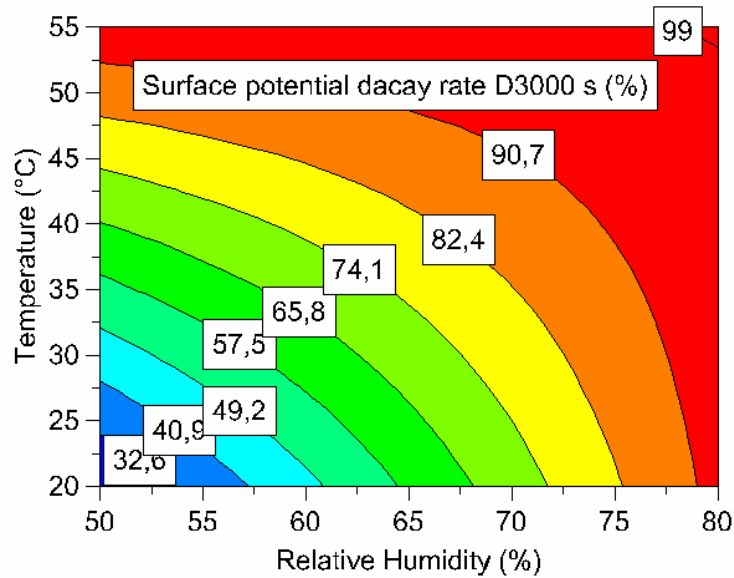


Figure II.17 : Iso-contours des taux prédits du déclin de potentiel de surface à long terme  $D_{3000s}$ , en fonction de la Température  $\theta$  et l'Humidité Relative HR [87].

On peut citer aussi notre travail sur la modélisation par réseaux de neurones artificiel du déclin d'un polyéthylène téréphtalate d'épaisseur de 0.5 mm [109]. Nous avons réalisé un modèle neuronal optimale pour prédire le DPS en jouant sur les trois facteurs (température, humidité relative et le potentiel initial) influant sur le DPS.

La figure II.18 montre la réponse du modèle neuronal obtenu avec une précision de l'ordre de 0.002, ce résultat n'est que la confirmation de l'intérêt de cette méthode et du modèle obtenue.

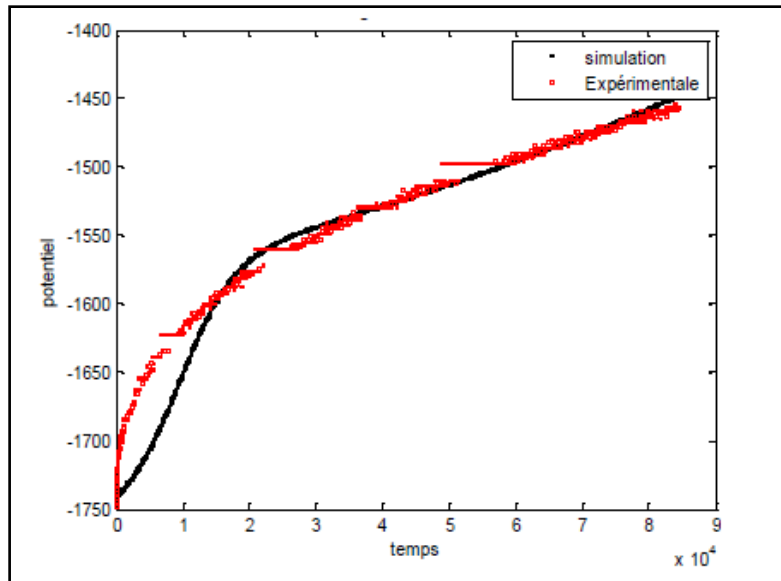


Figure.II.18 : Analyse comparative de la prédiction du DPS par le réseau optimal dans la phase du test [109].

## II.9. Conclusion

La technique de mesure de la différence de potentiel de surface (DPS) présente plusieurs intérêts clés, notamment dans les domaines de la science des matériaux, de l'électrotechnique et de l'environnement. Elle facilite ainsi l'analyse précise des propriétés électriques des matériaux, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de leur comportement électrostatique et à des ajustements plus efficaces dans diverses applications. Elle permet d'évaluer les propriétés électrostatiques des matériaux, essentielles pour comprendre leur comportement dans des applications électriques. C'est un indicateur crucial de la qualité de l'isolement dans des dispositifs électriques et électroniques.

# **Chapitre III : Algorithmes**

## **Evolutionnaires**

### III.1. Introduction

Les algorithmes évolutionnaires sont des méthodes d'optimisation inspirées par les principes de l'évolution naturelle. Ils font partie de la famille des algorithmes génétiques et sont utilisés pour résoudre des problèmes complexes dans divers domaines. L'intérêt suscité par cette modélisation découle de la correspondance entre la perspective de l'évolution selon le néodarwinisme et un problème d'optimisation. En effet, Les algorithmes peuvent ajuster leurs paramètres ou stratégies en cours d'exécution, permettant une adaptation aux changements dans l'environnement ou la nature du problème. Ceci permet d'aboutir à des générations mieux adaptées aux exigences difficiles de leur environnement, et augmentant ainsi leur possibilité de survie. Les transformations au niveau chromosomique se traduisent, sur une certaine période, par la parution des espaces qui ont perduré en transmettant leur bagage génétique aux générations suivantes.

De manière pratique, un algorithme évolutionnaire repose sur l'idée d'une collectivité d'individus, où chaque individu représente une solution envisageable pour un problème donné. L'algorithme fait progresser cette collectivité en suivant des règles spécifiques, simulant ainsi le processus de l'évolution naturelle. Cette évolution de la collectivité aboutit à l'apparition d'individus qui maximisent une fonction d'évaluation (appelée "fitness" en anglais), reflétant ainsi l'ajustement d'un individu à son environnement.

Ce qui rend les algorithmes évolutionnaires particulièrement attrayants, c'est leur grande efficacité en matière d'optimisation pour des problèmes complexes. Ces problèmes se caractérisent par de multiples variables, un vaste espace de recherche et une structure peu définie. En outre, ces algorithmes offrent l'avantage de mener leurs recherches à partir d'une population initiale, généralement caractérisée par une grande diversité.

Parmi ces algorithmes les plus connus et plus répandus sont les algorithmes génétiques introduits par Holland [110], et plus précisément, pour l'optimisation de variables, par D. Jong [111].

Sur un autre plan, Storn et Price [112, 113], ont utilisé les méthodes d'auto-adaptation pour optimiser leurs performances en apprenant des résultats des générations précédentes, améliorant ainsi la convergence vers des solutions optimales. [114].

Dans la suite nous allons détailler en particulier l'algorithme génétique, puis, l'algorithme à évolution différentielle.

## III.2. Les Algorithmes Génétiques

Les concepts d'évolution naturelle et de sélection naturelle, notamment les travaux de Charles Darwin, inspirent la création de modèles computationnels. Dans les années 1960, John Holland à l'Université du Michigan développe les bases des AG dans son livre "Adaptation in Natural and Artificial Systems". Il introduit le concept de l'algorithme génétique comme un moyen d'adaptation et d'optimisation. Les algorithmes génétiques imitent les processus naturels de sélection et d'évolution pour trouver des solutions optimales à des problèmes complexes. Ils sont flexibles et peuvent être adaptés à une large gamme d'applications. Une population de solutions potentielles est générée aléatoirement. Chaque solution est appelée un individu. Les individus peuvent être représentés sous différentes formes, comme des chaînes binaires, des vecteurs de nombres réels ou d'autres structures adaptées au problème. Ces individus, définis par des variables, représentent les paramètres à ajuster dans un dispositif, formant ainsi la base de l'algorithme génétique pour l'optimisation des solutions.

Ce paragraphe expose le principe essentiel de l'évolution par sélection naturelle, un concept central dans la théorie de l'évolution de Charles Darwin. Il établit une analogie avec les mécanismes biologiques pour décrire le processus d'optimisation dans les algorithmes évolutionnaires appliqués en informatique et en recherche opérationnelle.

Dans un contexte biologique, les individus les mieux adaptés à leur environnement ont une probabilité accrue de survie et de reproduction, transmettant ainsi leurs caractéristiques avantageuses à la génération suivante. De manière analogue, dans les algorithmes évolutionnaires, on démarre avec une population initiale d'individus, souvent générée de manière aléatoire, dans le but de résoudre un problème donné. Ces individus sont évalués en fonction de leur performance par rapport au problème, et les plus performants sont choisis pour se reproduire.

Lors du processus de reproduction, les gènes des parents sont combinés pour créer une nouvelle population, représentant une nouvelle génération d'individus. Certains individus de cette nouvelle génération héritent des qualités avantageuses de leurs parents et sont donc censés être de meilleures solutions au problème.

Ce processus de sélection, reproduction et héritage génétique est répété sur plusieurs générations, avec les individus les mieux adaptés ayant une plus grande probabilité d'être sélectionnés et de se reproduire à chaque étape. Au fur et à mesure que le processus évolue, les individus tendent à converger vers une meilleure solution au problème donné.

À la fin du processus, les membres de la dernière génération possèdent un héritage génétique qui correspond à la meilleure solution trouvée jusqu'à présent pour le problème donné. Ces individus peuvent être très différents de leurs ancêtres de la population initiale, car ils ont subi

une évolution par sélection et reproduction, tout comme dans le processus d'évolution biologique.

Effectivement, l'algorithme génétique de base est construit sur trois opérations fondamentales: Sélection, Reproduction et Mutation. Ils sont relativement simples, similaires à des opérations algébriques, mais elles sont essentielles pour faire évoluer la population d'individus vers des solutions optimales.

**Sélection :** Cette opération consiste à évaluer chaque individu de la population en fonction de sa performance par rapport à l'objectif du problème à résoudre (fonction d'évaluation ou fitness).

**Reproduction :** Une fois les individus sélectionnés, la reproduction consiste à combiner leurs gènes pour créer une nouvelle génération d'individus.

**Mutation :** La mutation est une opération aléatoire qui intervient pendant la reproduction. Elle consiste à modifier aléatoirement certains gènes des individus.

### **III.3. Définitions de base des algorithmes génétiques**

Voici quelques définitions des composants clés des algorithmes génétiques :

- Individu : Un individu représente une solution potentielle au problème que l'algorithme tente de résoudre. Il est généralement codé sous forme de gènes qui représentent les caractéristiques de la solution. Chaque gène est une unité de codage qui peut représenter une valeur ou un paramètre d'une solution.
- Population : La population est un ensemble d'individus qui constitue une génération dans l'algorithme génétique. L'algorithme commence avec une population initiale aléatoire, et cette population évolue au fil des générations grâce aux opérations de sélection, reproduction et mutation.
- Gène : Un gène est une partie de l'individu qui code une caractéristique spécifique ou une partie de la solution au problème. Les gènes peuvent représenter des fonctions ou des opérateurs dans des arbres syntaxiques.
- Fonction d'évaluation (Fitness) : Évalue la qualité de chaque individu dans la population. Cette valeur représente à quel point l'individu est "adapté" ou "bon" pour résoudre le problème.

- Sélection : Elle détermine quels individus de la population vont être retenus pour la reproduction et pour transmettre leurs gènes à la génération suivante. Les sélections les plus courantes sont par élitisme ou stochastique.
- Reproduction : est le processus par lequel de nouveaux individus (solutions) sont générés à partir de ceux de la génération précédente. Cela implique principalement deux opérateurs : le croisement et la mutation.
- Mutation : La mutation est une opération aléatoire qui intervient pendant la reproduction. Elle consiste à modifier aléatoirement certains gènes des individus pour introduire une exploration de nouvelles solutions dans l'espace de recherche.
- Chromosome : est une représentation codée d'une solution potentielle à un problème donné. Il est composé de gènes, qui sont des unités d'information. Les chromosomes sont utilisés pour explorer l'espace de solutions à travers des opérations inspirées de la sélection naturelle, comme le croisement et la mutation.
- Locus : Le locus est l'emplacement spécifique d'un gène sur le chromosome. C'est l'endroit où une variable ou un gène particulier est situé dans la séquence de l'individu.
- Allèle : Un allèle est un symbole qui représente une version spécifique d'un gène donné. Dans le contexte des algorithmes génétiques, les allèles peuvent être représentés par des lettres (comme ATCG dans la génétique naturelle) ou par un alphabet binaire (1 ou 0).
- Croisement : est une opération dans les algorithmes génétiques qui combine deux chromosomes (solutions potentielles) pour créer une ou plusieurs nouvelles solutions. Cette technique s'inspire de la reproduction biologique et vise à exploiter les caractéristiques des parents pour produire des descendants prometteurs.

### **III.4. Les opérateurs des algorithmes génétiques**

Chaque algorithme génétique suit une structure commune, fonctionnant de manière similaire et suivant une méthodologie identique. Chaque algorithme génétique est caractérisé par un cycle fondamental, illustré dans la Figure III.1. En premier lieu, un ensemble de solutions ou d'individus est créé pour former la population initiale. Ensuite, les individus de cette population sont évalués et classés. Ensuite, un sous-ensemble de parents est constitué pour privilégier les solutions les plus performantes. Ensuite un ensemble d'enfants est constitué en utilisant la mutation et le croisement. Une fois que l'ensemble d'enfants est créé, leur performance est

évaluée pour comparer leur niveau de leur succès. Par la suite, ce processus se répète à partir de cette nouvelle génération jusqu'à ce que le critère d'arrêt initialement défini soit atteint [115].

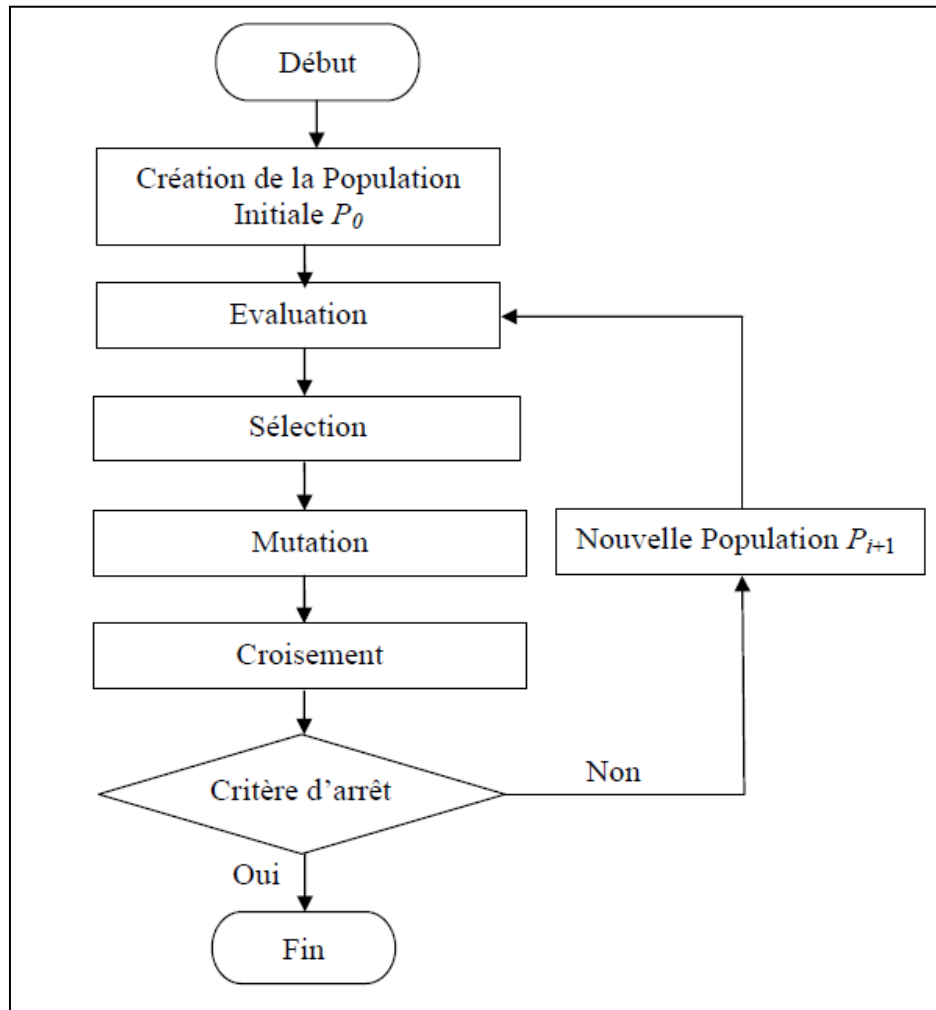


Figure III.1 : Schéma de principe d'un Algorithme Génétique [115].

### III. 4.1. Population initiale

L'algorithme génétique débute par La création d'une population initiale souvent créée aléatoirement, mais elle peut aussi être basée sur des solutions connues ou des heuristiques. Les individus de la population peuvent être représentés sous différentes formes et ont un impact significatif sur la vitesse de l'algorithme. En l'absence d'une connaissance préalable de la position optimale dans l'espace de recherche, disperser la population sur toute cette étendue s'avère avantageux.

Étant donné que la population de départ est souvent diversifiée, il est essentiel de maintenir cette diversité pour explorer efficacement l'espace de recherche. Cela augmente les chances de trouver de bonnes solutions [116].

### III.4.2. Le codage

Le codage, en particulier dans le contexte des algorithmes génétiques, se réfère à la manière dont les solutions potentielles (individus) sont représentées dans l'algorithme. Les principes fondamentaux des codages sont définis par les chaînes binaires, les nombres réels, les permutations et les structures complexes. Le codage facilite l'application des opérateurs génétiques (croisement, mutation, sélection) pour générer de nouvelles solutions à partir de la population existante.

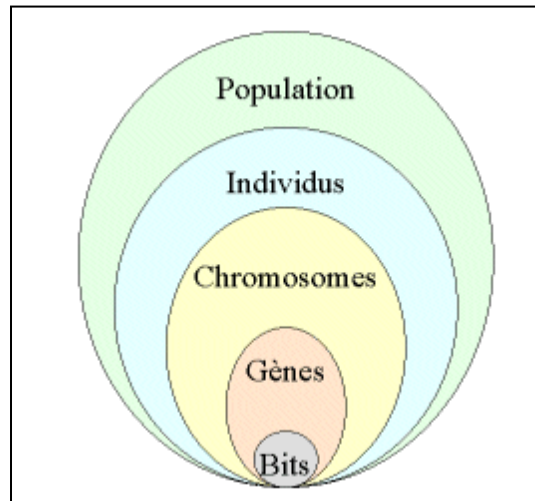


Figure III.2 : Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique.

La méthode de codage choisie doit être adaptée à la nature du problème à résoudre pour maximiser l'efficacité de l'algorithme figure III.2.

#### III.4.2.1. Codage binaire

Tout d'abord, il est essentiel de comprendre comment les individus sont codés. Dans le contexte des algorithmes génétiques à multiples paramètres, la pratique habituelle consiste à représenter chaque paramètre sous la forme d'une séquence de bits.

Ces séquences sont ensuite successivement assemblées pour former un chromosome plus étendu, constituant ainsi le vecteur des paramètres. Chaque séquence individuelle dans ce vecteur global est dénommée un gène, et la valeur associée à chaque gène représente un allèle.

#### III.4.2.2. Codage réel

Ceci peut s'avérer particulièrement bénéfique lorsqu'on vise à déterminer le point culminant d'une fonction réelle.

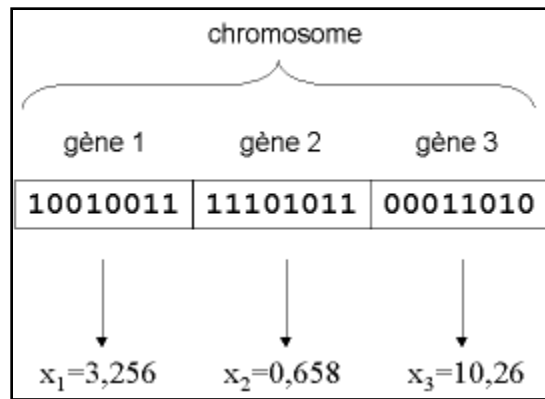


Figure III.3 : Illustration schématique du codage des variables réelles.

### III.4.3. L'évaluation

Cette procédure garantit le maintien des individus performants tout en éliminant progressivement ceux qui s'avèrent moins adaptés. Chaque individu est évalué de manière indépendante, le coût d'un point dans l'espace de recherche étant déterminé par la fonction d'évaluation  $f$ . Cette fonction, également connue sous le nom fonction fitness, guide la sélection ou le rejet des individus, permettant ainsi de conserver uniquement ceux présentant le meilleur coût au sein de la population actuelle [117].

### III.4.4. La Sélection

L'opérateur de sélection est sans doute l'un des éléments les plus cruciaux, car il détermine la survie, la reproduction ou l'élimination des individus au sein d'une population. En général, Les meilleurs individus sont garantis de survivre à la prochaine génération, assurant ainsi que les meilleures solutions ne soient pas perdues.

Les méthodes les plus utilisées pour la sélection des individus :

- La sélection par roulette proportionnellement à leur fitness.
- La sélection par Rang, les individus sont classés en fonction de leur fitness.
- La sélection par Tournoi, le meilleur individu parmi ce groupe est choisi [119].

#### III.4.4.1. Sélection par roulette (RWS : Roulette Wheel Selection)

Cette méthode implique de lier à chaque individu une plage sur la roulette, dont la taille est en proportion de sa performance. Ensuite, un nombre aléatoire est extrait d'une distribution uniforme entre 0 et 1. En fonction de la plage sur laquelle ce nombre tombe, l'individu correspondant est sélectionné pour être reproduit. La roulette présentée dans la Figure III.4 représente visuellement comment chaque individu est assigné à un segment dont l'angle est en proportion de sa performance, évaluée selon l'équation (III.1).

$$P_s(X_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)} \quad (\text{III. 1})$$

Où

$P_s$  représente la proportion de la valeur de la fonction objectif ( $\mathbf{x}_i$ ) d'un individu  $\mathbf{x}_i$  par rapport à la somme des objectifs de tous les  $N$  individus dans la population. Cela signifie qu'un individu ayant une haute qualité  $F$  en comparaison avec le reste de la population a davantage de probabilité d'être choisi pour la reproduction. Cependant, du fait de la sélection aléatoire, même les individus moins performants ont encore une chance d'être inclus dans le groupe de reproduction.

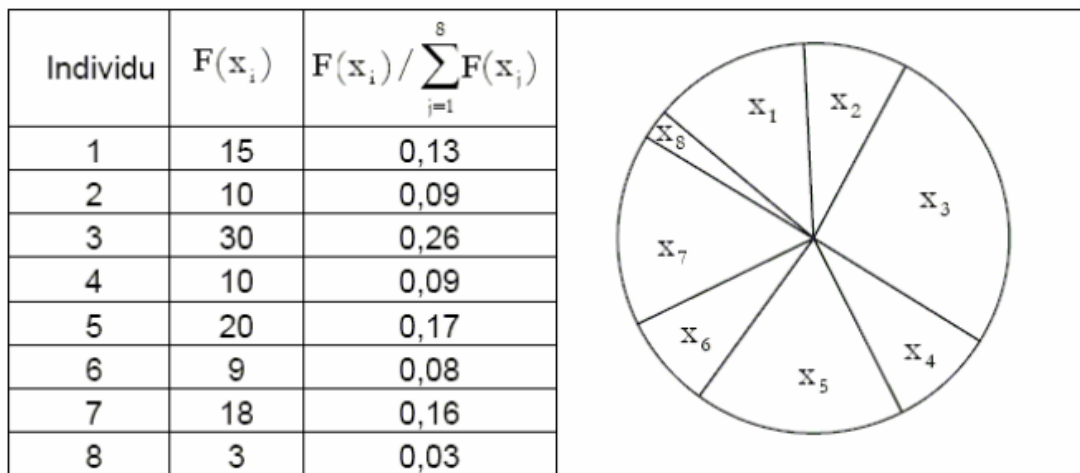


Figure III.4 : Exemple de roulette artificielle.

Un inconvénient de cette approche réside dans la possibilité de la formation d'un super-individu. Ce super-individu se caractérise par une probabilité de sélection nettement plus élevée que celle des autres individus. En conséquence, il pourrait être systématiquement privilégié, ce qui potentiellement restreint l'exploration globale [120].

Souvent, on privilégie des approches qui excluent totalement la formation de super-individus. Un exemple en est la méthode de sélection par tournoi.

#### III.4.4.2. Sélection par Tournoi

On utilise la différence aléatoire de paires d'individus, où le vainqueur, le meilleur des deux, est déclaré lors du tournoi.

Cette méthode possède une capacité à éviter la formation de super individus, un problème potentiel dans les méthodes de sélection précédentes. Cependant, il peut être limité dans la sélection des individus optimaux, restreignant ainsi le champ de recherche [121].

### **III.4.4.3. Sélection par Stochastic Universal Sampling (SUS)**

Cette méthode repose sur le même principe que la sélection par roulette, mais elle utilise plusieurs indicateurs équidistants. Bien que cette approche proportionnelle de choix puisse présenter un problème de graduation, on utilise la méthode de sélection de rang [122].

### **III.4.4.4. Méthode de Sélection par Rang**

La sélection est effectuée en fonction de leur rang plutôt que de leur valeur de fitness absolue. Cela aide à éviter la dominance de quelques individus très performants. Chaque individu se voit attribuer un rang, où le meilleur individu obtient le rang 1, le deuxième le rang 2, et ainsi de suite [123].

### **III.4.5. Le croisement ou crossover**

L'opérateur de croisement exerce une fonction essentielle en générant de nouveaux individus par le biais d'un processus simple mais puissant, facilitant ainsi l'échange d'informations entre les membres d'une population. C'est un processus fondamental dans les algorithmes génétiques qui permet de créer de nouveaux individus en combinant les gènes de deux parents. La probabilité qu'un croisement se produise pour une paire de parents. Un taux élevé favorise la diversité, tandis qu'un faible taux peut se concentrer sur l'exploitation des meilleures solutions.

Cependant, il est important de noter qu'un individu choisi pour la reproduction ne subit pas systématiquement le processus de croisement. Cela dépend d'une probabilité spécifique. À mesure que cette probabilité augmente, les changements au sein de la population seront plus fréquents.

Indépendamment des circonstances, l'association de la reproduction et du croisement peut parfois ne pas suffire pour assurer le succès d'un algorithme génétique (AG). Par exemple, dans le contexte du codage binaire, des informations spécifiques telles que des caractères d'un alphabet pourraient être perdues au sein de la population. Ainsi, même si aucun individu initial ne présente un "1" en dernière position de sa séquence, et que ce "1" soit essentiel dans la séquence optimale recherchée, il est possible que toutes les combinaisons de croisement envisageables ne parviennent pas à introduire ce "1" initialement absent. [124].

### III.4.5.1. Croisement en un point

Chaque paire d'individus, un emplacement de croisement est sélectionné de manière aléatoire (comme illustré dans la Figure III.5). Le croisement se réalise directement au niveau binaire plutôt qu'au niveau des gènes. Il est possible qu'un croisement soit effectué en traversant le milieu d'un gène.

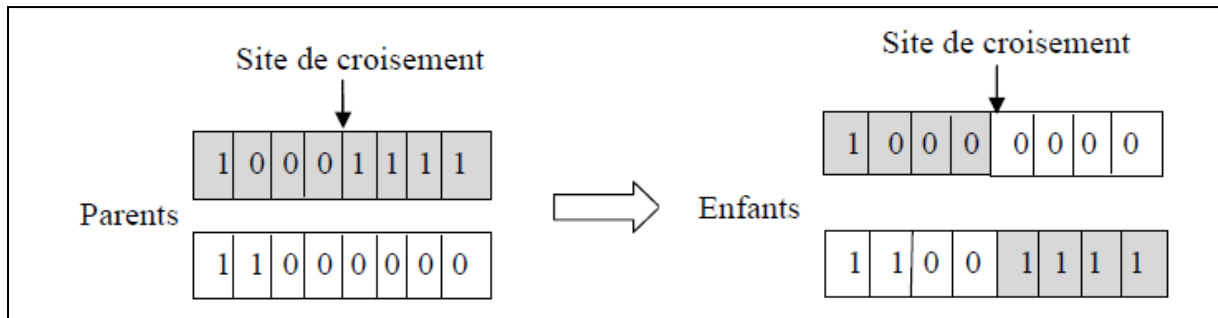


Figure III.5 : Représentation schématique du croisement en un point.

### III.4.5.2. Croisement en deux points

C'est une méthode de recombinaison qui permet de créer de nouveaux individus en échangeant des segments entre deux parents. Deux points de coupure sont sélectionnés au hasard dans les chaînes des parents. Ces points déterminent les segments à échanger [125].

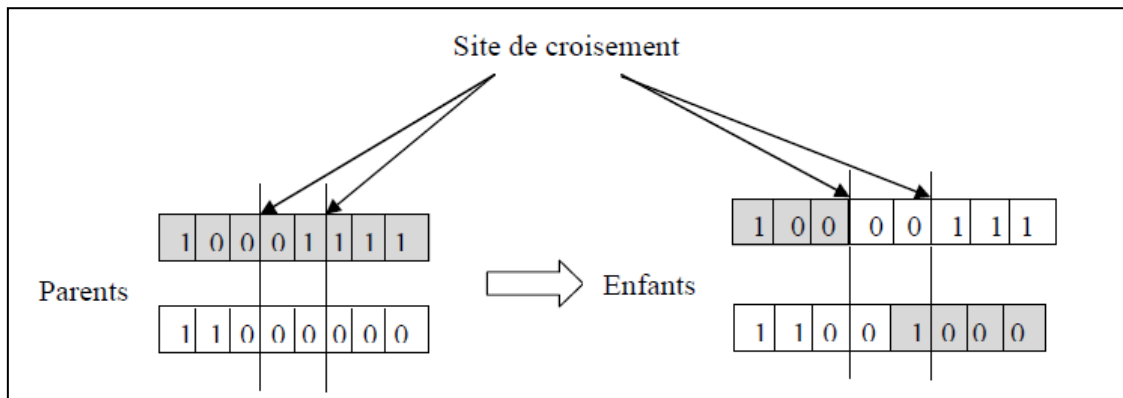


Figure III.6 : Représentation schématique du croisement en deux points.

### III.4.5.3. Croisement uniforme

Le mécanisme fonctionne en utilisant un masque qui reflète les tirages aléatoires, déterminant ainsi la transmission des valeurs d'allèles aux descendants. Si le masque affiche une valeur de 1 à une position correspondant à l'allèle, l'allèle du premier parent est transmis à l'enfant 1, tandis que l'allèle du deuxième parent est transmis à l'enfant 2. En revanche, si la valeur du masque diffère, la transmission s'effectue de manière opposée (voir Tableau III.1) [126]. Cela fonctionne en utilisant un masque représentant les tirages aléatoires.

Tableau III.1. Exemple de croisement uniforme

|          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Parent 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Parent 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Masque   | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Enfant 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Enfant 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |

### III.4.6. Mutation

La mutation est un opérateur essentiel dans les algorithmes génétiques, introduisant de la diversité dans la population en modifiant aléatoirement certains gènes d'un individu, Figure.III.7.

La mutation vise à éviter la convergence prématurée en ajoutant de la diversité génétique, ce qui permet d'explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche.

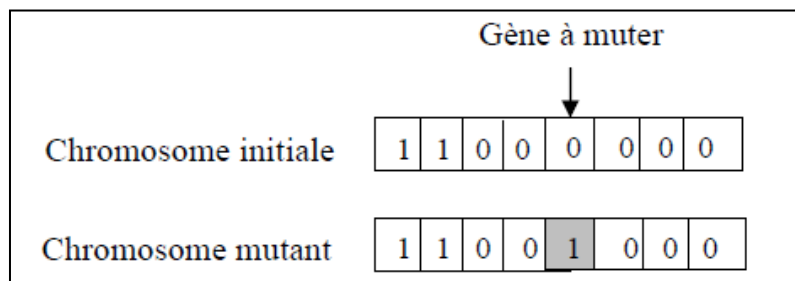


Figure III.7 : Représentation schématique de la mutation.

Le taux de mutation est défini comme la probabilité qu'un gène soit muté. Un taux trop bas peut empêcher l'exploration, tandis qu'un taux trop élevé peut déstabiliser la convergence. La mutation permet de créer de nouveaux individus, qui peuvent potentiellement avoir une meilleure performance ou des caractéristiques inédites [127].

### III.5. Paramètres d'un AG

Un choix judicieux de la taille de la population ( $N$ ) et la longueur du codage ( $L$ ) sont cruciaux, car une population trop grande peut entraîner des temps de calcul excessifs [128].

Les probabilités de croisement  $P_c$ , liée à la fonction de fitness, est souvent déterminée par des heuristiques. À mesure que  $P_c$  augmente, les modifications au sein de la population deviennent plus marquées, avec des valeurs couramment situées entre 0.5 et 0.9.

Quant à la probabilité de mutation  $P_m$ , maintenir une probabilité basse est courant pour éviter des altérations indésirables chez les individus de haute qualité [20]. Une alternative à la simple réduction de  $P_m$  est l'utilisation d'une approche d'élitisme explicite, où les meilleurs individus (par exemple, les 5% supérieurs) sont reproduits sans mutation, préservant ainsi leur qualité. Le reste

de la population (95%) est soumis à l'opérateur de reproduction. Cette approche est connue sous le nom de "stratégie élitiste".

### **III.6. Les algorithmes à évolution différentielle**

Ces dernières années, le domaine des algorithmes évolutionnaires a connu une croissance significative, avec une place prépondérante accordée à l'Évolution Différentielle (DE). De nos jours, plusieurs utilisations industrielles et scientifiques bénéficient des capacités de l'Évolution Différentielle.

Classée parmi les méthodes méta-heuristiques stochastiques d'optimisation, elle combine les inspirations des Algorithmes Génétiques et des Stratégies Évolutionnistes, en intégrant une approche géométrique de recherche. Les Algorithmes Génétiques apportent des modifications structurelles aux individus via des mutations et des croisements, tandis que les Stratégies Évolutionnistes réalisent une auto-adaptation à travers la manipulation géométrique des individus.

K. Price et R. Storn, a concrétisé ces concepts, transformant l'Évolution Différentielle en un outil essentiel pour résoudre divers problèmes réels ou de référence.

Au cours de la dernière décennie, l'évolution différentielle a connu un succès notable dans la résolution de problèmes scientifiques et industriels. Ses applications incluent l'ordonnancement de tâches pour les satellites.

#### **III.6.1. Principe de l'algorithme DE**

Dans l'algorithme DE, la différence pondérée entre deux individus est ajoutée à un troisième individu. Ce processus conduit à la création d'un individu test. Ensuite, un croisement entre l'individu mutant et l'individu correspondant de la population à lieu.

Au cours du processus évolutif, chaque individu cible et son homologue mutant sont en compétition, avec le meilleur individu. Les critères de mutation, de croisement, de sélection, et de critère d'arrêt sont très importants dans le succès global de l'algorithme DE en résolvant divers problèmes d'optimisation.

#### **III.6.2. Stratégie**

La stratégie des algorithmes d'évolution différentielle (Differential Evolution, DE) est une méthode d'optimisation par essaim qui s'inspire des processus de sélection naturelle. L'algorithme cherche à minimiser (ou maximiser) une fonction objectif en évoluant une population de solutions candidates à travers plusieurs générations. Les solutions sont généralement représentées sous forme de vecteurs dans un espace de recherche multidimensionnel.

Voici les principaux aspects dans la création d'une nouvelle génération dans le DE sont les suivantes :

### III.6.2.1. Mutation

La phase de mutation joue un rôle crucial dans l'Évolution Différentielle (DE), puisqu'elle est essentielle à la création d'un vecteur  $X_j$  de la population. Ce dernier illustre un désordre du vecteur  $X_i$ . Formellement, cela peut être exprimé comme suit :

$$V_j(t+1) = X_{r_1}(t) + F \times (X_{r_2}(t) - X_{r_3}(t)) \dots \dots \dots (III.2)$$

Où  $r_1, r_2$ , et  $r_3$  des indices qui reflètent des vecteurs de la population. La valeur de "F", une constante réelle, joue un rôle essentiel dans l'amplification de l'évolution différentielle, permettant ainsi d'éviter la stagnation lors de la recherche. On considère généralement que "F" se situe dans l'intervalle  $[0,2]$ . "t" représente le numéro de la génération en cours. On rencontre différentes diversités relatives à l'équation III.2 qui autorise de faire agir 2, 3 ou 4 vecteurs différents.

D'après [21], la formule de mutation appelée « DE/best/2/bin », est comme suit

$$V_j(t+1) = X_{best}(t) + F \times (X_{r_1}(t) + X_{r_2}(t) - X_{r_3}(t) - X_{r_4}(t)) \dots \dots \dots (III.3)$$

Où  $X_{best}(t)$  étant le meilleur individu dans la population à la génération t.

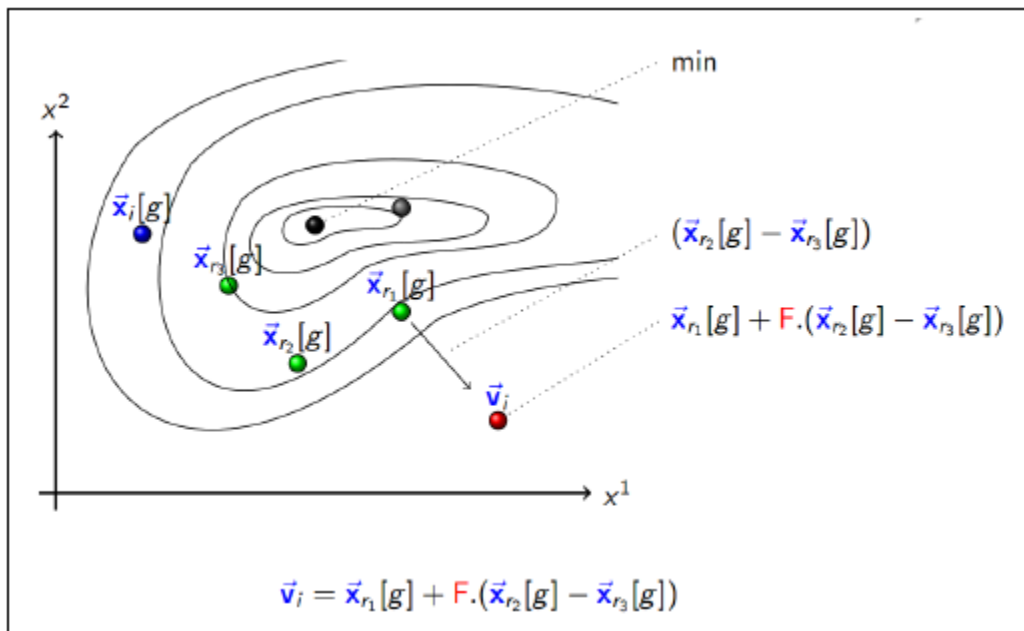


Figure III.8. Mutation différentielle [131].

### III.6.2.2. Croisement

Le croisement est une étape cruciale qui permet de combiner les informations d'un vecteur mutant avec un vecteur cible pour créer une nouvelle solution candidate. Le but est d'incorporer les caractéristiques des solutions existantes pour explorer l'espace de recherche tout en

conservant des éléments prometteurs des individus actuels. Un vecteur d'essai,  $U_j=(u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jd})$ , est créé. La conception du vecteur  $U_j$  suit la formule suivante :

$$u_{ji}(t+1) = \begin{cases} v_{ji}(t+1) & \text{si } rand \leq CR \text{ ou } j = rnbr(i) \\ x_j(t) & \text{si } rand > CR \text{ ou } j \neq rnbr(i) \end{cases} \dots \dots \dots (III.4)$$

Où :

- $x_{ji}$  est le  $j^{i\text{ème}}$  composant du vecteur  $x_i$ ,
- $v_{ji}$  est le  $j^{i\text{ème}}$  composant du vecteur variant  $V_i(t+1)$  ;
- $rand$  est une valeur aléatoire entre  $[0,1]$
- $CR$  est le taux de croisement
- $rnbr(i)$  est une valeur improbable entière assimilée entre  $[1,d]$ ,

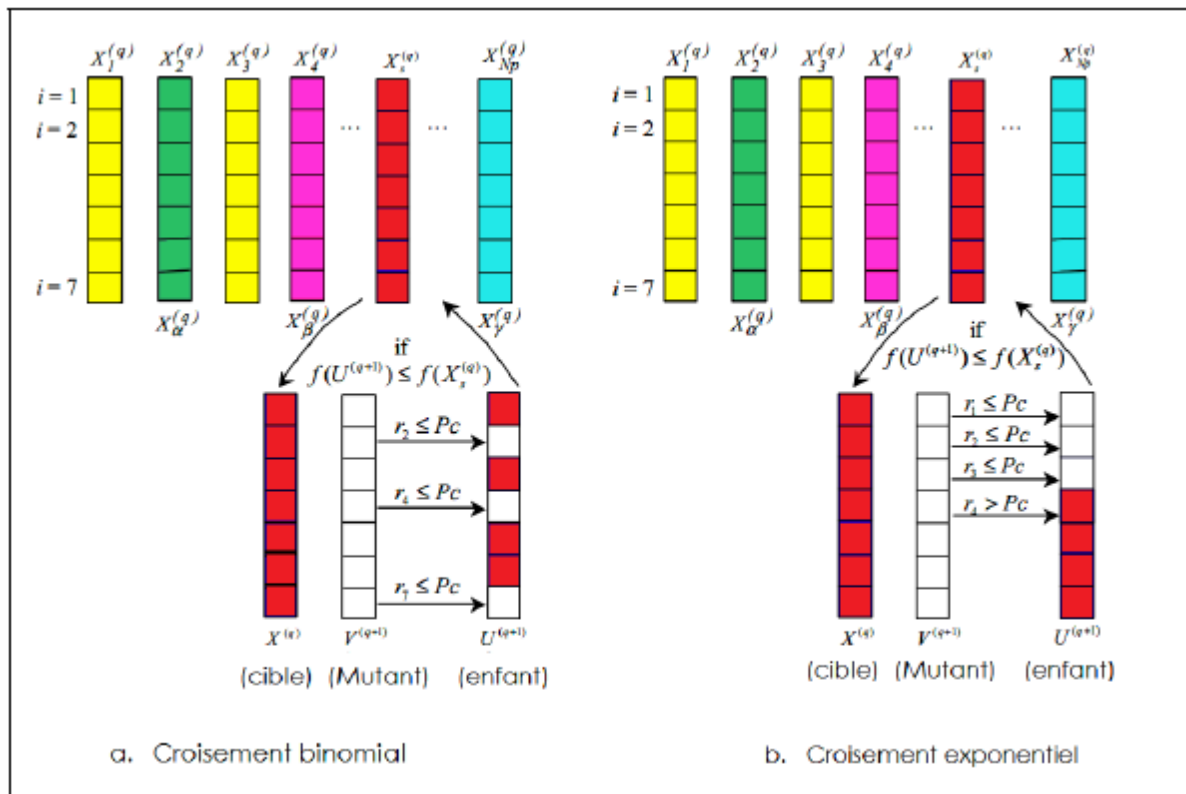


Figure III.9. Croisement différentiel : binomial à gauche, exponentiel à droite [132].

### III.6.2.3. Sélection

Dans le contexte des algorithmes d'évolution différentielle (DE), la sélection est une étape essentielle qui détermine quelles solutions seront conservées pour la prochaine génération. L'objectif est de garantir que les meilleures solutions, c'est-à-dire celles qui minimisent (ou maximisent) la fonction objectif, sont retenues pour continuer à évoluer.

### III.6.2.4 Critère d'arrêt

Les critères d'arrêt habituels pour un algorithme d'évolution différentielle (DE) englobent :

1. L'atteinte d'un nombre prédéfini d'itérations  $G_{max}$ , considéré comme suffisamment élevé pour résoudre efficacement le problème.
2. On constate une modification importante dans la valeur de la fitness.
3. Une fonction adaptative, reflétant la réponse satisfaisante aux exigences spécifiques du problème.

### III.6.3. Procédure

L'Évolution Différentielle possède une nomenclature spécialisée qui décrit sa configuration. Elle prend la forme DE/x/y/z, où x la solution à perturber, y le nombre de vecteurs de différence utilisés dans la perturbation de x et z indique l'opérateur de recombinaison appliqué, tel que "bin" pour la recombinaison binaire et "exp" pour la recombinaison exponentielle. Plusieurs variantes de l'Évolution Différentielle ont démontré leur efficacité [133].

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) + F(x_{r4,G} - x_{r5,G}) \quad (III. 5)$$

$$v_{i,G+1} = x_{best,G} + F(x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (III. 6)$$

$$v_{i,G+1} = x_{best,G} + F(x_{r1,G} - x_{r2,G}) + F(x_{r3,G} - x_{r4,G}) \quad (III. 7)$$

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) + F(x_{r4,G} - x_{r5,G}) + F(x_{best,G} - x_{i,G}) \quad (III. 8)$$

$$v_{i,G+1} = x_{i,G} + F(x_{r1,G} - x_{r2,G}) + F(x_{best,G} - x_{i,G}) \quad (III. 9)$$

$$v_{i,G+1} = x_{i,G} + K(x_{r3,G} - x_{i,G}) + F'(x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (III. 10)$$

Le coefficient K est le coefficient de combinaison, choisi aléatoirement dans [0, 1] et  $F' = K F$ .

Dans ce schéma, il n'y a pas de croisement après mutation.

$$v_{i,G+1} = \begin{cases} x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) & \text{si } U(0,1) < P_F \\ x_{r3,G} + K(x_{r1,G} + x_{r2,G} - 2x_{r3,G}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (III. 11)$$

En plus des variantes proposées par Storn et Price, les chercheurs continuent de développer de nouvelles variantes des algorithmes à évolution différentielle dans le domaine de l'optimisation combinatoire. Généralement, ces variantes diffèrent selon le mode de croisement ou de mutation utilisé.

Dans leur analyse approfondie des algorithmes d'Évolution Différentielle, Das et Suganthan [25] ont examiné diverses variantes, dont l'ED avec croisement arithmétique, l'ED avec mutation trigonométrique, le DE/rand/1/Either-Or, l'ED basée sur l'opposition, l'ED avec mutation basée sur le voisinage, l'ED avec sélection adaptative de mutation, et l'ED adaptative avec mutation DE/Current-to-pbest.

En outre, leur revue a également abordé des hybridations entre l'Évolution Différentielle et d'autres méta-heuristiques [134].

### **III.6.4. Avantages et limites de l'évolution différentielle**

#### **III.6.4.1. Avantages de l'évolution différentielle**

Depuis la fin des années 1990, les algorithmes d'Évolution Différentielle (DE) ont captivé l'attention dans divers milieux académiques et industriels, principalement en raison des points suivants [134].

- Les algorithmes DE se distinguent par leur facilité d'implémentation par rapport à d'autres approches évolutives. Cette simplicité de programmation est essentielle, particulièrement pour les non-informaticiens qui recherchent des solutions d'optimisation simples à configurer pour résoudre des problèmes complexes spécifiques à leur domaine. Il est important de noter que même si l'heuristique d'optimisation par essais particuliers (OEP ou PSO en anglais) est également simple à programmer et à paramétrer, l'algorithme DE demeure plus efficace.

#### **III.6.4.2. Limites de l'évolution différentielle**

Malgré son efficacité et sa robustesse, l'algorithme DE présente des limitations notables :

- Ses performances sont sensibles aux valeurs des paramètres  $F$ ,  $CR$  et  $NP$  [135], ce qui implique qu'un choix inadéquat de ces paramètres peut entraîner des résultats peu satisfaisants [136].
- Une sélection inappropriée de ces paramètres peut dégrader les performances de l'algorithme [137].
- Bien que des recommandations existent dans la littérature pour la sélection des paramètres, leur applicabilité reste fortement dépendante du problème [138].

## **III.7. Conclusion**

Les algorithmes évolutionnaires, ont été définis comme une solution prometteuse pour aborder les défis de l'optimisation, exposant leurs principes fondamentaux et leur utilité dans ce domaine.

Par la suite, notre attention s'est portée sur les algorithmes à évolution différentielle, détaillant leurs principes fondamentaux et leur comportement générique. Ces approches offrent également des perspectives encourageantes pour l'optimisation.

Enfin, une analyse approfondie des propriétés de l'évolution différentielle a été réalisée, mettant en évidence son potentiel dans la simulation et la mise en œuvre de systèmes complexes adaptatifs.

En résumé, cette section a offert une exploration approfondie des algorithmes évolutionnaires, soulignant leurs avantages spécifiques et leur pertinence tant pour la résolution de problèmes d'optimisation que pour la modélisation mathématique.

**Chapitre IV. Modélisation Expérimentale  
Du Déclin De Potentiel En  
Surface**

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous amorçons notre exposé en présentant tout d'abord les résultats expérimentaux du déclin de potentiel en surface. Puis nous essayerons d'analyser les résultats sur la modélisation du DPS. A partir des algorithmes génétiques nous présentons les effets entre certains facteurs et leurs interactions.

Les recherches sur le potentiel de surface et leur modélisation sont principalement associées à divers domaines de la recherche. Un isolant chargé par effet couronne possède sur sa surface potentiel. Ce potentiel diminue avec le temps, reflétant la capacité du matériau à dissiper la charge accumulée à sa surface par le biais de mécanismes complexes et variés [138].

Il est crucial d'analyser l'écoulement des charges statiques en surface de ces matériaux lorsqu'ils sont exposés à des contraintes climatiques telles que la température et l'humidité. Les charges peuvent s'injecter, polarise l'isolant où s'écouler en surface, renforçant ainsi localement le champ électrique. Cela peut entraîner un échauffement local et/ou une dégradation des propriétés physico-chimiques, altérant ainsi les caractéristiques du diélectrique.

L'utilisation de la méthode de DPS est simple. Les résultats sont généralement efficaces [139,88]. Notre intérêt se focalise particulièrement sur l'impact de trois facteurs distincts sur le déclin du potentiel en surface :

1. Le potentiel initial  $V_0$ .
2. La température  $\theta$ .
3. L'humidité relative HR.

Puisque les expériences prennent énormément de temps pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes, on utilise un algorithme pour la modélisation du DPS s'avère nécessaire afin d'obtenir des résultats dans des délais raisonnables.

Les méthodes méta-heuristiques présentent l'avantage de limiter l'exploration à une portion de l'espace de recherche, permettant ainsi d'approcher une solution optimale. Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons particulièrement sur les méta-heuristiques évolutionnaires telles que les algorithmes génétiques, l'algorithme à évolution différentielle, les colonies de fourmis, etc. [141,143], dans le but de les appliquer à la modélisation du DPS et d'évaluer leurs performances.

De nos jours, Les algorithmes d'optimisation sont de plus en plus utilisés, en particulier les algorithmes génétiques et l'algorithme à évolution différentielle. [111,134,146].

L'algorithme à Évolution Différentielle (ED) se distingue en tant que méta-heuristique d'optimisation globale basée sur la population, reconnue pour sa simplicité, sa fiabilité et sa rapidité. Initialement conçu pour des problèmes d'optimisation continus et non contraints, nous avons choisi de l'employer dans la modélisation et la résolution du problème d'optimisation. Suite

à une évaluation approfondie, des ajustements légers ont été apportés à son processus pour améliorer la vitesse de convergence et renforcer sa capacité à trouver l'optimum global.

Ces ajustements comprennent l'introduction d'un mécanisme spécifique visant à éviter la convergence vers un optimum local, un défi fréquemment rencontré par de nombreuses méta-heuristiques évolutionnaires.

Grâce à ces améliorations, l'évolution différentielle s'est affirmée comme un outil plus efficace et fiable pour la résolution de problèmes d'optimisation complexes, favorisant une exploration étendue de l'espace de recherche tout en contournant les écueils des optima locaux.

Comparativement à d'autres algorithmes évolutionnaires, l'algorithme d'évolution différentielle (ED) se démarque par son efficacité et sa simplicité dans l'analyse des données.

L'approche simplifiée des différentes opérations rend l'utilisation de l'algorithme ED facile et efficace tout en explorant de manière efficiente l'espace de recherche. En privilégiant une stratégie globale et en minimisant la complexité génétique, l'ED parvient à conserver des performances satisfaisantes tout en restant relativement simple à mettre en œuvre et à programmer. Cette caractéristique en fait un choix attrayant pour la résolution de problèmes d'optimisation dans divers domaines.

L'algorithme d'évolution différentielle (ED) se démarque par sa capacité de mémoire spécifique, lui permettant de suivre dynamiquement la recherche en cours. Cette aptitude à ajuster sa stratégie de recherche en temps réel se traduit par une convergence globale robuste, adaptée aux problèmes d'optimisation complexes. Cette capacité d'adaptation fait de l'ED un outil particulièrement intéressant.

## **IV.2. Technique de DPS et matériau**

La technique de déclin de potentiel de surface (ou "surface potential decay") est utilisée principalement en électrochimie et en sciences des matériaux pour analyser les propriétés électriques de surfaces et interfaces. En étudiant la courbe de déclin, on peut déduire des informations sur les propriétés électriques de la surface, comme la densité de charges, la conductivité et les caractéristiques de transport des ions.

Cette technique est utile dans des domaines comme la corrosion, la catalyse, et l'étude des dispositifs électroniques, où la compréhension des propriétés de surface est cruciale.

Toutes les expériences sont menées au sein d'une enceinte climatique, ce qui permet de contrôler les paramètres de température ( $\theta$ ) et d'humidité relative (HR).

Pour chaque expérience, un nouvel échantillon est utilisé afin d'éviter toute influence d'une mesure sur une autre. Le protocole des essais expérimentaux est détaillé dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1: Protocole d'essais expérimentaux.

| N° | Facteurs  |               |          | Réponses      |                |
|----|-----------|---------------|----------|---------------|----------------|
|    | $V_0$ (V) | $\theta$ (°C) | $RH$ (%) | $D_{500}$ (%) | $D_{3000}$ (%) |
| 1  | -1000     | 20            | 50       | 04.88         | 20.22          |
| 2  | -1800     | 20            | 50       | 10.37         | 29.90          |
| 3  | -1000     | 55            | 50       | 37.59         | 94.82          |
| 4  | -1800     | 55            | 50       | 51.46         | 99.34          |
| 5  | -1000     | 20            | 80       | 36.51         | 89.72          |
| 6  | -1800     | 20            | 80       | 50.84         | 97.72          |
| 7  | -1000     | 55            | 80       | 91.30         | 100            |
| 8  | -1800     | 55            | 80       | 99.51         | 100            |
| 9  | -1400     | 37.5          | 65       | 45.94         | 76.64          |
| 10 | -1400     | 37.5          | 65       | 43.93         | 76.23          |
| 11 | -1400     | 37.5          | 65       | 42.92         | 76.08          |

L'application de la technique du déclin de potentiel en surface se divise en deux étapes : une phase de modélisation suivie d'une phase d'analyse. La première phase implique l'utilisation d'algorithmes génétiques pour déterminer les paramètres d'un modèle polynomial, qui dans notre contexte représente le taux de déclin  $D_t$  [%] sur une période de temps spécifique. Dans la seconde phase, le modèle obtenu est employé pour analyser l'impact des facteurs sur le déclin de potentiel en surface (DPS).

$$D_t = (V_0 - V_t)/V_0 \times 100 \text{ [%]} \dots\dots\dots(VI.1)$$

Où:

$V_t$ : Le potentiel mesuré à l' instant t.

Nous avons choisi d'étudier deux zones d'évolution du potentiel  $t = 500s$  (courte durée) et  $t = 3000s$  (longue durée).

$V_0$ : Le potentiel de dépôt.

### IV.3. Modélisation mathématique

On commence par sélectionner une fonction mathématique préalablement choisie, dans laquelle la réponse est associée à des coefficients. Ensuite, Après on applique utilise la série de Taylor-Mac Laurin. Ce qui permet d'exprimer la fonction sous forme d'un polynôme :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (\text{VI.2})$$

Où:

y: est la grandeur de sortie mesurée expérimentalement.

$x_i$  : Correspond au niveau assigné au facteur i par l'expérimentateur pour conduire un essai. Cette valeur est complètement établie et identifiable. On considère même que cette valeur est fixée avec précision.

$a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  : Coefficients du modèle mathématique. Leurs valeurs doivent être calculé à partir des résultats obtenus lors des expériences.

Cette approche nous la possibilité de calculer ultérieurement toutes les réponses dans le domaine d'étude sans nécessiter la réalisation des expériences. Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle à priori".

### IV.4. Modèle d'étude

La réponse de ce processus est déterminée en relation avec  $e$  facteurs, sous forme d'un polynôme du premier degré [6].

$$y = f(u_i) = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ijk} u_i u_j u_k \quad (\text{VI.3})$$

On calcule pour chaque facteur :

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_i = u_i^* \quad (\text{VI.4})$$

Où:

$$u_{ic}^* = (u_{i\max} + u_{i\min}) / 2 ; \Delta u_i = (u_{i\max} - u_{i\min}) / 2 \quad (\text{VI.5})$$

On obtient :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijk} x_i x_j x_k \quad (\text{VI.6})$$

Dans ce cas, pour les 3 facteurs :  $x_1 = V_0^*$  ;  $x_2 = \theta^*$  ;  $x_3 = RH^*$

On obtient :

$$y = a_0 + a_1 V_0^* + a_2 \theta^* + a_3 RH^* + a_{1,2} V_0^* \theta^* + a_{1,3} V_0^* RH^* + a_{2,3} \theta^* RH^* + a_{1,2,3} V_0^* \theta^* RH^* \dots (\text{VI.7})$$

Où :

$a_0$  : La valeur prédite ;

$a_i$  : L'effet de facteur  $x_i$  ;

$a_{ij}$  : L'interaction entre  $x_i$  et  $x_j$

$a_{ijk}$  : L'interaction entre  $x_i$ ,  $x_j$ ,  $x_k$

## IV.5. Mise en œuvre de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique est une méthode d'optimisation qui s'inspire du mécanisme de sélection naturelle pour guider l'évolution des solutions vers une meilleure performance. Il peut servir à résoudre des problèmes d'optimisation, qu'ils soient contraints ou non contraints.

Le processus de l'AG débute avec une population initiale de solutions individuelles (souvent appelées individus ou chromosomes). Ces solutions sont évaluées en fonction de leur aptitude (fitness) pour résoudre le problème présent.

Dans l'étape de sélection on imite le processus de survie et de reproduction en prenant les individus les plus adéquats de la population pour obtenir une nouvelle génération. Différentes stratégies peuvent être choisies, telles que la sélection par roulette, le tournoi ou la sélection par rang.

Lorsqu'on termine cette partie, des opérations génétiques sont appliquées pour créer de nouvelles solutions, souvent appelées descendants. Ces opérations génétiques incluent le croisement et la mutation. Ce dernier utilise des caractéristiques des parents choisis pour créer des descendants, tandis que la mutation introduit une petite modification aléatoire dans les individus pour augmenter la diversité génétique.

En utilisant une approche itérative basée sur la sélection naturelle et les opérations génétiques, la nouvelle génération de solutions est évaluée pour leur aptitude. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'on obtienne une satisfaction. Cette méthodologie permet à l'algorithme génétique d'explorer progressivement l'espace de recherche, convergeant vers des solutions potentiellement optimales pour le problème d'optimisation donné.

L'algorithme génétique utilise trois types principaux de règles à chaque étape pour créer une nouvelle génération.

- Les individus sont choisis puis appelés parents et vont contribuer à la population de la prochaine génération.
- Ensuite, les parents forment des enfants en combinant les règles de croisement.
- Les règles de mutation appliquent des modifications aléatoires aux parents pour avoir des enfants.

Il faut d'abord obtenir une population de vecteur de coefficients polynomiaux à différentes longueurs. Chaque membre représente donc une solution pour le modèle polynomial recherché.

#### IV.5.1. Codage proposé

Nous utilisons ici le codage binaire signé, chaque coefficient  $a_i$  est codé par N gène binaire ( $g_{i0}$ ,  $g_{i1}, \dots, g_{iN}$ )

Où :

N : Le nombre de bits codant un coefficient ;

$g_{i0}$  : Représente le gène qui code le bit de signe.

$$g_{i0} = \begin{cases} 1 & (\text{signifie que } a_i \text{ est un nombre négatif}) \\ 0 & (\text{signifie que } a_i \text{ est un nombre positif}) \end{cases}$$

$g_{i1}, \dots, g_{i\frac{N}{2}}$  : Représentent les gènes qui codent la partie entière (à gauche de la virgule)

du coefficient  $a_i$ .

$g_{i(\frac{N}{2}+1)}, \dots, g_{iN}$  : Représentent les gènes qui codent la partie décimale (à droite de la virgule) du

coefficient  $a_i$ .

**Exemple**

Si on a le coefficient  $a_1$  codé par 8 gènes "1 0 0 1 0 1 0 0"

- Le signe du coefficient est négatif :  $g_0 = 1$  ;
- La partie entière :  $g_{i1} \dots g_{i\frac{N}{2}} = (0 0 1)_2 = 1$  ;
- La partie décimale :  $g_{i(\frac{N}{2}+1)} \dots g_N = (0 1 0 0)_2 = 0.25$

Donc :  $a_1 = -1,25$

Tous les gènes codant les coefficients forment un chromosome figure IV.1, si le nombre des coefficients égale à K, alors le chromosome est codé comme suit :

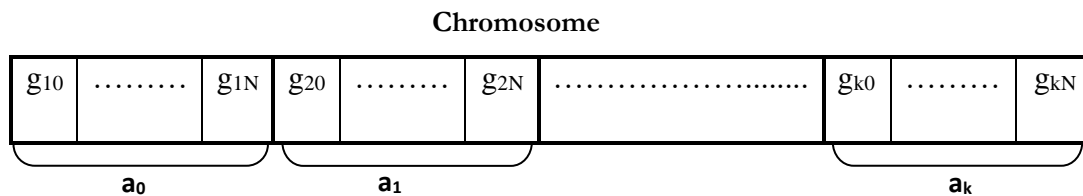


Figure IV.1. Codage d'une solution.

La taille du chromosome =  $N \times K$

**IV.5.2. Fonction objectif**

La fonction objectif, également appelée fitness, attribue une valeur à chaque individu. Cette valeur sert à évaluer si un individu est mieux adapté à l'environnement qu'un autre. En d'autres termes, elle quantifie la performance d'une solution potentielle en réponse au problème donné.

Cette fonction est basée sur l'erreur entre la sortie prédite du modèle et la valeur expérimentale mesurée, et elle est définie par la relation suivante :

$$F_{obj} = \frac{1}{N_e} \sum_1^{N_e} (y_i - y_{mes}) \dots \dots \dots (VI.8)$$

Où :

$N_e$ : le nombre des essais expérimentaux ;

$y_i$ : la réponse prédite par le modèle ;

$y_{mes}$ : la réponse mesurée.

### IV.5.3. Opérateurs génétiques utilisés

Nous avons d'abord choisi la stratégie de classement pour la sélection. Les chromosomes sont classés en fonction de leurs valeurs de fitness croissantes et se voient accorder des probabilités de sélection en par rapport à leurs rangs. Pour ce qui concerne la phase de reproduction (comprenant le croisement et la mutation), nous avons adopté la stratégie élitiste, qui maintient le chromosome le plus performant inchangé lors de la transition entre les générations successives [147].

Les opérateurs de l'algorithme génétique sont régis par un ensemble prédéterminé de paramètres, [132,148]. Ces paramètres comprennent :

- La taille de la population,  $N_{pop}$ , et la longueur du codage  $L$  : Si  $N_{pop}$  est très importante, le temps de l'algorithme peut être très grand, et si  $N_{pop}$  est moins importante, il peut être rapide et aller vers un mauvais chromosome. Dans notre cas nous avons pris  $N_{pop} = 101$ .
- La probabilité de croisement  $P_c$  : généralement, son choix est heuristique. Plus il est élevé, plus les changements importants se produisent dans la population. Le taux habituel est choisi entre 60% et 80%. Dans notre cas nous avons pris  $P_c = 0.8$ .
- La probabilité de mutation  $P_m$  : Ce taux est généralement maintenu à un niveau bas (entre 0.1% et 5%), car un taux élevé risque d'entraîner une exploration trop aléatoire de l'espace de recherche. Au lieu de simplement réduire  $P_m$ , une autre approche pour empêcher les individus de haute qualité d'être altérés consiste à utiliser une "stratégie élitiste". Ainsi, l'opérateur de reproduction n'affecte que les 95% restants de la population. Dans notre cas nous avons pris  $P_m = 0.05$ .
- L'algorithme génétique est exécuté jusqu'à ce qu'au moins un individu atteigne une valeur de fitness suffisante, préalablement définie.

Le test d'arrêt est défini par une valeur de fitness fixée à priori.

### IV.6. Résultats de la modélisation

Les algorithmes génétiques (AGs) ont été programmés sous Matlab 6.5. Les paramètres requis par les AGs pendant l'estimation du modèle polynomial sont regroupés au sein du tableau IV.2, le code représenté par le format binaire du premier modèle  $D_{500}$  est d'une longueur de 128 bits ( $16\text{Bit} \times 8$  coefficients) et le code du deuxième modèle  $D_{3000}$  est d'une longueur de 144 bits ( $18\text{ bits} \times 8$  coefficients).

Tableau.IV.2. Paramètres de l'algorithme génétique.

| <b>Paramètres</b>         | <b>Valeurs</b>      |
|---------------------------|---------------------|
| Population                | 101                 |
| Probabilité de croisement | 0.8                 |
| Probabilité de mutation   | 0.05                |
| Type de croisement        | En un point         |
| Test d'arrêt              | 2.95 ( $D_{500}$ )  |
|                           | 1.45 ( $D_{3000}$ ) |

Les résultats de modélisation obtenus par les AGs sont résumés par le tableau IV.3. Nous observons que la qualité du modèle est satisfaisante, ceci est traduit par un taux d'erreur faible (2,9499 %, 1.4496 %).

Tableau IV.3. Coefficients des modèles polynomiaux.

| <i>D<sub>500</sub></i>  |          |                  |
|-------------------------|----------|------------------|
| Effets et Interactions  | Valeurs  | Erreur du modèle |
| <i>a<sub>0</sub></i>    | 38.8398  | 2.94 %           |
| <i>a<sub>1</sub></i>    | 5.2539   |                  |
| <i>a<sub>2</sub></i>    | 22.1679  |                  |
| <i>a<sub>3</sub></i>    | 21.7617  |                  |
| <i>a<sub>12</sub></i>   | 0.2421   |                  |
| <i>a<sub>13</sub></i>   | 0.3632   |                  |
| <i>a<sub>23</sub></i>   | 3.7070   |                  |
| <i>a<sub>123</sub></i>  | -2.0000  |                  |
| <i>D<sub>3000</sub></i> |          |                  |
| <i>a<sub>0</sub></i>    | 78.2402  | 1.44 %           |
| <i>a<sub>1</sub></i>    | 3.0000   |                  |
| <i>a<sub>2</sub></i>    | 19.5878  |                  |
| <i>a<sub>3</sub></i>    | 17.9277  |                  |
| <i>a<sub>12</sub></i>   | -1.5957  |                  |
| <i>a<sub>13</sub></i>   | -0.7460  |                  |
| <i>a<sub>23</sub></i>   | -16.3730 |                  |
| <i>a<sub>123</sub></i>  | -0.3339  |                  |

Une fois les coefficients sont déterminés, on établit les modèles mathématiques suivants :

$$D_{500} = 38.8398 + 5.2539 V_0^* + 22.1679 \theta^* + 21.7617 RH^* + 0.2421 V_0^* \theta^* + 0.3632 V_0^* RH^* + 3.7070 \theta^* RH^* - 2V_0^* \theta^* RH^* \dots\dots\dots (VI.9)$$

$$D_{3000} = 78.2402 + 3V_0^* + 19.5878 \theta^* + 17.9277 RH^* - 1.5957 V_0^* \theta^* - 0.7460 V_0^* RH^* - 16.3730 \theta^* RH^* - 0.3339 V_0^* \theta^* RH^* \dots\dots\dots (VI.10)$$

Les modèles (*D<sub>500s</sub>*, *D<sub>3000s</sub>*) montrent clairement l'effet important de la température, l'humidité relative et l'effet de l'interaction entre eux.

Une observation intrigante émerge en analysant de plus près les coefficients des modèles des deux polynômes. On observe que le potentiel de dépôt  $V_0$  est moins important par rapport aux autres facteurs : température et humidité relative. Ces derniers ont un effet important sur le taux du DPS, notamment au début de déclin  $D_{500s}$ , on constate aussi que leur interaction a un effet important sur le taux de DPS à court et à long terme ( $D_{500s}$ ,  $D_{3000s}$ ) ce qui confirme les résultats obtenus représentés par les courbes de la figure IV.2 qui montre des courbe iso-réponse de Taux de DPS ( $D_{500s}$ ,  $D_{3000s}$ ) en fonction de la température et l'humidité relative, à  $V_0 = -1400V$  ;

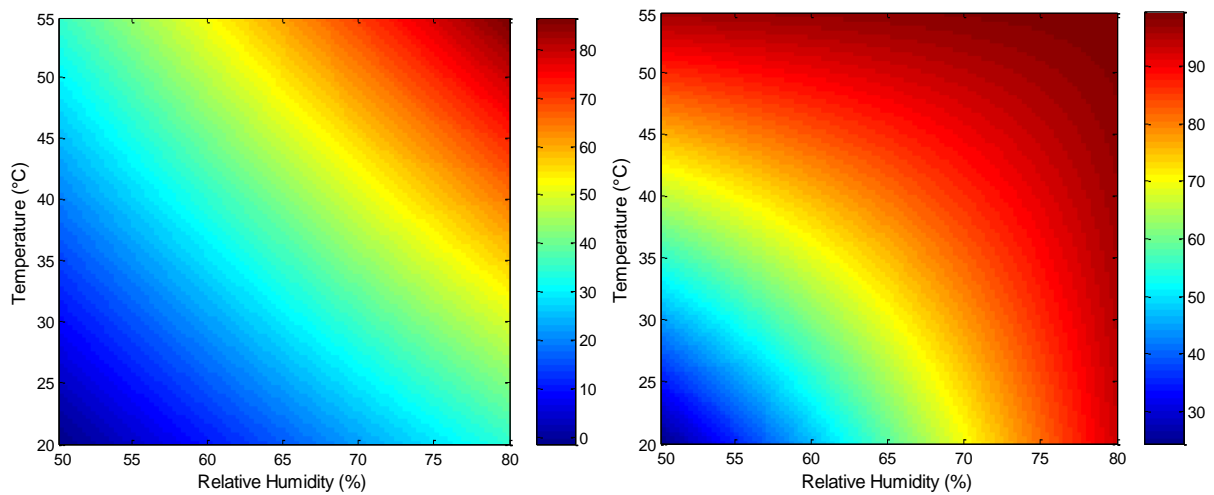


Figure IV.2. Taux du DPS prédit par l'AG en fonction de la température  $\theta$  et l'humidité relative  $RH$  : (a) ( $D_{500s}$ ) et (b) ( $D_{3000s}$ ).

De plus, en se basant sur le modèle mathématique obtenu, il est possible de constater l'effet de chaque facteur sur la réponse en regardant la variation des réponses en fonction de ces facteurs figures IV.3 et IV.4.

Dans chaque cas, les deux autres variables sont maintenues constantes et égales à leurs valeurs centrales  $V_0 = -1400V$ ,  $\theta = 37.5^\circ C$ ,  $RH = 65\%$ .

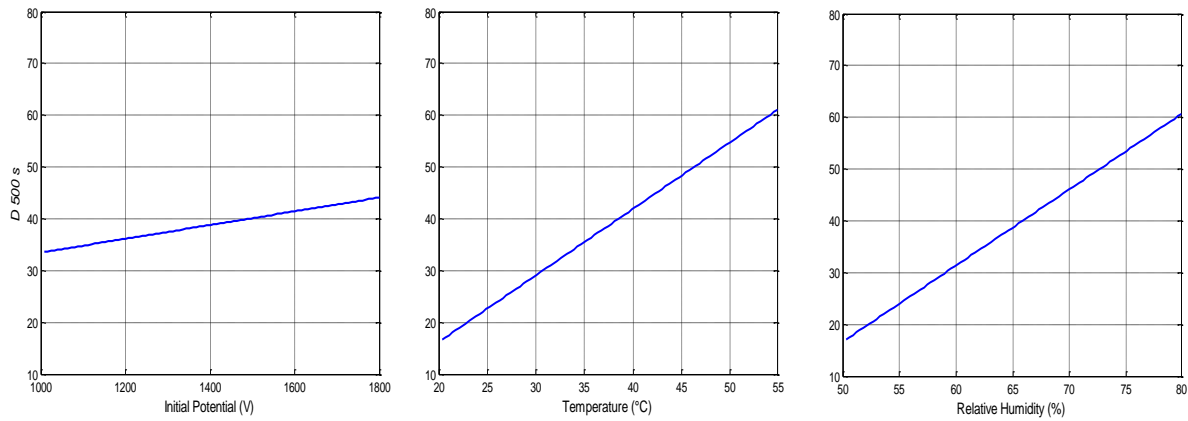


Figure IV.3. Réponses prédites à courte durée ( $D_{500s}$ ) par AG en fonction des facteurs : ( $V_0$ ,  $\theta$  et RH).

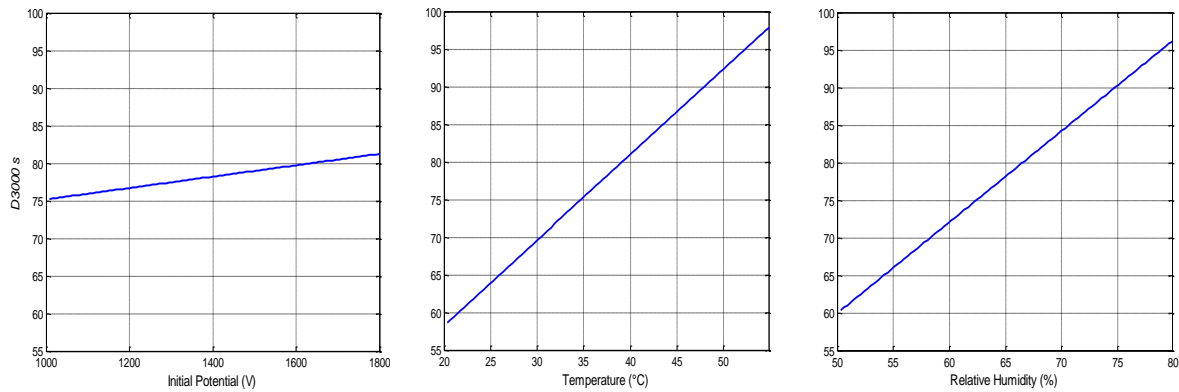


Figure IV.4. Réponses prédites à longue durée ( $D_{3000s}$ ) par AG en fonction des facteurs : ( $V_0$ ,  $\theta$  et RH).

Aux premiers instants de mesure (0-500s), la chute du potentiel est très importante, elle dépend fortement de la température  $\theta$  et de l'humidité relative RH. Par contre, la valeur du potentiel initial a une influence moins établie sur l'allure des courbes et donc sur la vitesse de déchargement.

Le modèle linéaire  $D_{3000s}$  qui est considéré comme la continuité du modèle  $D_{500s}$  montre que le DPS dépend toujours de la température et de l'humidité mais les valeurs des coefficients sont moins importantes. Par conséquent, on peut déduire que le DPS dépend du mouvement des porteurs de charges et de son mécanisme. Pour des températures et des humidités plus importantes on peut imaginer un déclin de potentiel plus important et une vitesse de déchargement plus rapide qui seraient causés par une plus grande mobilité de la charge, une approche qui définit une évolution de la mobilité en fonction du champ. De plus, pour les temps longs, on constate que sur la surface de l'isolant une partie de la charge reste piégée. Le potentiel reste donc constant et proportionnel à la charge non injectée.

## IV.7. L'évolution différentielle

Etant l'un des algorithmes évolutionnaires les plus efficaces dans le domaine de l'optimisation, l'algorithme à évolution différentielle (ED) est une méta-heuristique appartenant à la famille des algorithmes évolutionnaires à base de populations [150].

Dans l'algorithme ED, les solutions sont représentées sous forme de populations d'individus. Chacun peut être décrit par un ensemble de nombres réels. Ces nombres réels sont les valeurs des paramètres de la fonction à minimiser et qui *mesure* la qualité d'un individu [151].

L'algorithme ED utilise un croisement non uniforme, intégrant des paramètres pour générer des vecteurs enfants à partir d'un seul parent figure IV.5.

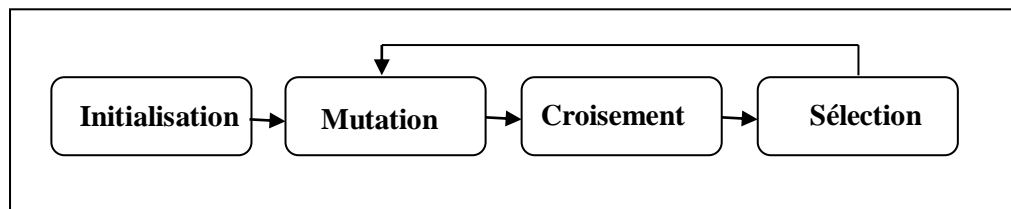


Figure IV.5. Etapes de l'algorithme ED.

Ces principales opérations sont basées sur les différences entre des paires d'individus échantillonnés au hasard dans la population. L'algorithme utilise l'opération de mutation comme mécanisme de recherche et l'opération de sélection pour diriger la recherche vers les régions potentielles dans l'espace de recherche [156].

L'algorithme ED utilise aussi le croisement qui peut prendre des paramètres de vecteur enfant d'un parent plus souvent que d'autres. En utilisant les composants de la population existante pour construire des vecteurs d'essai, la recombinaison, l'opérateur fournit des informations sur les combinaisons réussies, ce qui permet de rechercher un meilleur espace de solution. L'algorithme ED est une technique d'optimisation qui modifie de manière itérative une population de solutions candidates pour la faire converger vers un optimum de notre fonction [157]. Le flux de traitement typique de cet algorithme est comme suit Figure IV.6:

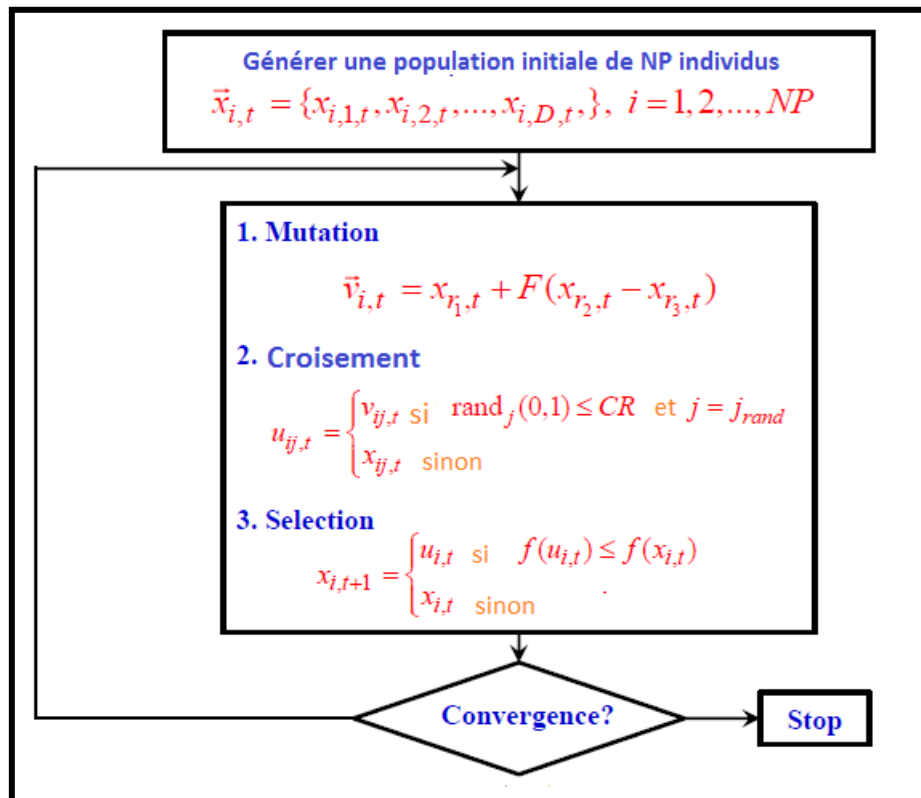


Figure IV.6. Flux de traitement de la méthode ED.

- Etape 1 - On débute par créer une population où chaque individu est constitué par un vecteur qui représente une solution candidate et ses composants tirés au hasard tout veillant au respect des contraintes.
- Etape 2 - On crée un vecteur mutant :  $V_{it} = x_{r1,t} + F(x_{r2,t} - x_{r3,t})$ , où  $x_{r1,t}$ ,  $x_{r2,t}$ ,  $x_{r3,t}$  sont trois vecteurs solutions candidates, distinctes, choisis au hasard parmi les individus de la population.  $F$  est une variable aléatoire  $\in [0,2]$ .
- Etape 3 - On permute de manière aléatoire des composantes vectorielles entre  $X$  et  $V$  pour produire un vecteur d'essai  $U$ . Au moins un composant de  $V$  doit être échangé.
- Etape 4 - On remplace  $X$  dans la population par  $U$  uniquement s'il s'agit d'un meilleur candidat (c'est-à-dire qu'il optimise mieux la fonction objectif).

Ces étapes sont répétées plusieurs fois afin d'aboutir à une solution satisfaisante, comme indiqué par la référence [160].

L'une des grandes forces de l'évolution différentielle réside dans sa relative simplicité de programmation, ce qui en facilite la mise en œuvre dans divers contextes. De plus, pour son bon fonctionnement, l'évolution différentielle ne nécessite que trois principaux paramètres :

Taille de la population ( $N$ ) : La taille de la population fait référence au nombre d'individus (solutions potentielles) présents dans chaque génération de l'algorithme.

Taux de croisement (CR) : détermine la probabilité que deux individus (ou chromosomes) soient croisés pour produire une ou plusieurs descendants. Le croisement permet d'explorer de nouvelles solutions en combinant des caractéristiques de parents. Cela favorise la diversité génétique et peut mener à de meilleures solutions au fil des générations.

Facteur d'échelle (F) : Le facteur d'échelle détermine comment les valeurs de fitness des individus sont converties en probabilités de sélection. Cela permet de contrôler la pression sélective exercée sur la population.

En ajustant ces trois paramètres de manière appropriée, l'évolution différentielle peut être adaptée aux caractéristiques spécifiques du problème d'optimisation à résoudre, améliorant ainsi ses performances et sa capacité à trouver des solutions de bonne qualité.

#### **IV.8. Mise en œuvre de l'algorithme à évolution différentielle**

Généralement, la théorie de l'évolution clarifie comment les espèces évoluent au fil du temps [161]. Les individus les mieux adaptés à leur environnement ont une meilleure probabilité de survie et de reproduction, transmettant ainsi leurs traits favorables à leur descendance. Cette transmission des caractéristiques avantageuses conduit à une amélioration générationnelle, et la population évolue pour mieux s'adapter à son environnement.

Les algorithmes évolutifs utilisent ces principes pour résoudre des problèmes d'optimisation. Ils commencent par une population initiale de solutions (individus) pour le problème donné. En évaluant leur aptitude (fitness), les solutions les plus performantes sont sélectionnées pour former une nouvelle génération de solutions.

Lors de cette sélection, des opérations génétiques sont appliquées pour développer de nouvelles solutions en combinant les caractéristiques des individus sélectionnés.

En répétant ces étapes, recombinaison et mutation sur plusieurs générations, la population évolue pour s'améliorer et converger vers des solutions plus optimales au problème d'optimisation [162,163].

Nous allons à présent voir comment ces opérations sont appliquées dans notre étude pour la minimisation de la fonction  $f_{obj}$ .

### IV.8.1. Initialisation

Nous commençons par créer une population composée d'individus de tailles variables. Au début, l'algorithme initialise les individus en générant des valeurs aléatoires pour chaque paramètre dans les limites données. Dans notre travail le domaine d'étude est le suivant:

- La tension de dépôt :  $V_{0\min} = -800\text{V}$  ;  $V_{0\max} = -1800\text{V}$  ;
- La température :  $\theta_{\min} = 20^\circ\text{C}$  ;  $\theta_{\max} = 60^\circ\text{C}$  ;
- L'humidité relative :  $\text{RH}_{\min} = 20\%$  ;  $\text{RH}_{\max} = 80\%$ .

Nous devons trouver les paramètres  $x_i$  pour notre polynôme qui minimise la fonction  $f_{\text{obj}}$ .

### IV.8.2. Évaluation

À ce stade, nous avons notre population initiale de 40 vecteurs et nous pouvons maintenant les évaluer à l'aide de notre  $f_{\text{obj}}$ . Après l'évaluation de ces vecteurs aléatoires, nous pouvons voir le vecteur qui est le meilleur de la population, avec une  $f_{\text{obj}}$  minimale, donc ces valeurs devraient être plus proches de ceux que nous recherchons.

### IV.8.3. Mutation et Recombinaison

Nous présentons à présent comment l'algorithme peut-il trouver une bonne solution.

A chaque vecteur  $X$  de la population, nous choisissons d'une manière aléatoire de la population trois autres vecteurs :  $x_{r1,t}$ ,  $x_{r2,t}$ ,  $x_{r3,t}$ . Nous commençons donc par le premier vecteur de la population initiale (appelé vecteur cible), et afin de sélectionner  $x_{r1,t}$ ,  $x_{r2,t}$ ,  $x_{r3,t}$ , ce que nous faisons est d'abord, nous générons une liste avec les indices des vecteurs de la population, à l'exclusion du vecteur actuel ( $j = 0$ ).

Nous créons un vecteur mutant combinant  $x_{r1,t}$ ,  $x_{r2,t}$ ,  $x_{r3,t}$  en calculant la différence entre  $x_{r2,t}$  et  $x_{r3,t}$  en ajoutant ces différences à  $x_{r1,t}$  après les multipliant par un facteur aléatoire de mutation appartenant à l'intervalle  $[0,1]$ . Un facteur de mutation plus important augmente le rayon de recherche mais peut ralentir la convergence de l'algorithme.

A l'étape de recombinaison, on crée un vecteur d'essai composé d'un mélange d'éléments provenant du vecteur mutant et du vecteur  $X$ . Cela se fait en changeant les éléments à certaines positions du vecteur actuel par ceux du vecteur mutant. Pour chaque position, nous décidons (avec une probabilité de recombinaison définie par « recomb ») si cet élément sera remplacé ou non par celui du mutant à la même position.

Une itération est accomplie lorsqu'on aura traité tous les vecteurs de la population. On exécute un nombre déterminé d'itérations. A la fin de chaque itération on détermine la meilleure solution globale. A la fin du traitement, le vecteur représentant la meilleure solution globale nous donne les coefficients optimaux qui minimisent la fonction objective.

## IV.9. Amélioration de l'algorithme ED

L'algorithme ED standard souffre du fait qu'il tombe facilement dans le problème de l'optimum local. Dans le but de contourner ce problème, nous préconisons deux aspects de modification :

Le premier aspect porte sur la diversification de la population initiale à travers l'introduction du concept du système chaotique [164]. Le deuxième aspect non seulement améliore la diversification mais aussi accélère la convergence. Des tests et évaluations concluants ont été effectués sur des fonctions benchmarks.

En effet, le premier aspect de notre proposition consiste à introduire le concept du Chaos.

Le chaos possède la propriété de non-répétition et pour cela il recherche la meilleure solution plus rapidement que toute stratégie de recherche qui dépend de la distribution de probabilité. Il possède également une propriété d'ergodicité [165]. La séquence chaotique montre une propriété d'ergodicité qui facilite la recherche. L'ergodicité se rapporte à un processus dans lequel chaque séquence ou échantillon important est également représentatif de l'ensemble (comme pour un paramètre statistique). En d'autres termes, elle implique ou se rapporte à la probabilité qu'un état se reproduise, en particulier : ayant une probabilité nulle qu'aucun état ne se reproduise.

Nous utilisons une équation logistique pour produire la population initiale. L'équation de cartographie logistique est la suivante :

$$x_{m+1,n} = \mu x_{m,n} (1 - x_{m,n}) \quad (\text{VI.11})$$

Avec  $(n=1.2\dots,N \quad ; \quad m=1.2\dots,M)$

Quand  $x_{m,n} \in [0,1]$ , et  $0 < \mu \leq 4$ , le système est à l'état chaotique..

$x_{m,n}$  est transformé selon la formule (VI.11) afin de construire la population initiale avec une taille égale à  $M$  et une dimension égale à  $N$ .

$$x_{m,n} = L_n + x_{m,n} (U_n - L_n) \quad (\text{VI.12})$$

Où :

$U_n$  et  $L_n$  sont respectivement la limite supérieure et la limite inférieure.

La production d'une population uniforme à l'aide de la cartographie du chaos logistique peut perfectionner le rendement de la recherche de l'algorithme.

Le deuxième aspect porte sur l'introduction d'un opérateur de croisement qui combine le vecteur cible  $X$  avec le vecteur Mutant  $V$ , selon la formule suivante :

$$E = \alpha * V_i + (1-\alpha)*X_i \quad (VI.13)$$

Où  $\alpha \in [0,1]$ .

Au moment de la sélection, nous prenons le meilleur individu.

#### IV.10. Evaluation

Afin d'analyser l'efficacité de notre amélioration de l'algorithme à évolution différentielle (ED), soit deux fonctions de référence :

- La fonction sphère :

$$f(x) = \sum_{j=1}^d x_j^2 \quad (VI.14)$$

- La fonction Griewank:

$$f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{j=1}^d x_j^2 - \prod_{j=1}^d \cos\left(\frac{x_j}{\sqrt{j}}\right) + 1 \dots \dots \dots (VI.15)$$

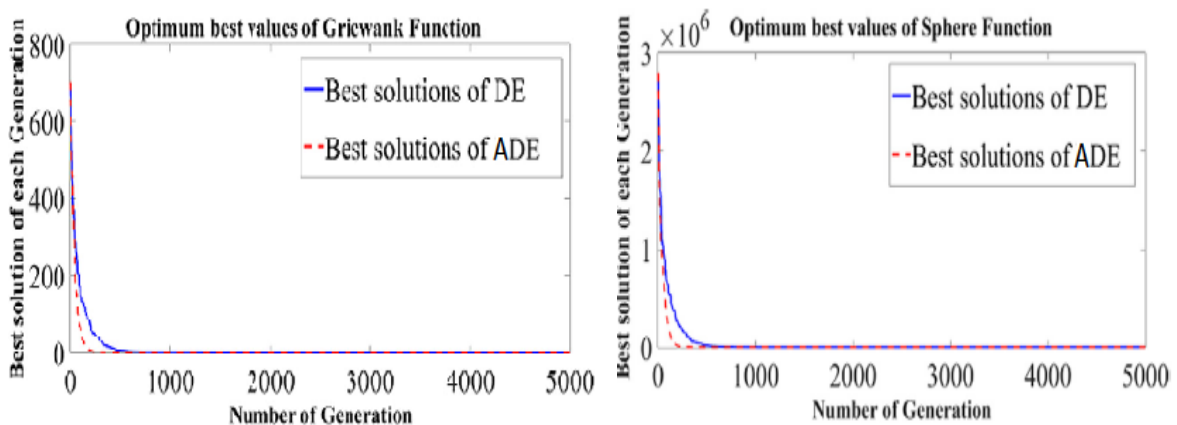


Figure IV.7. Solutions optimales obtenues par ED améliorée par opposition à ED obtenu par l'évolution différentielle classique pour les fonctions Sphère et Griewank.

La figure IV.7 illustre bien que l'ED amélioré présente une meilleure convergence pour les fonctions Sphere et Griewank.

## IV.11. Résultats

Notre méthodologie d'apporter la solution par les algorithmes à évolution différentielle a été implémentée sous Python 3.7. Les paramètres requis pendant l'estimation du modèle polynomial sont regroupés au sein du tableau IV.4.

Tableau. IV.4 : Paramètres de l'algorithme ED.

| Paramètres                         | Valeurs |
|------------------------------------|---------|
| Nombre d'itérations $D_{3000s}$    | 7000    |
| Nombre d'itérations $D_{500s}$     | 4000    |
| NP : taille de la population       | 40      |
| mutate : poids différentiel        | 0.5     |
| recomb : probabilité de croisement | 0.8     |

La figure IV.8 illustre l'évolution de la fonction sélective du meilleur individu pour les deux intervalles du temps ( $D_{500s}$ ) et ( $D_{3000s}$ ). On voit sur cette figure une convergence rapide vers la solution optimale.

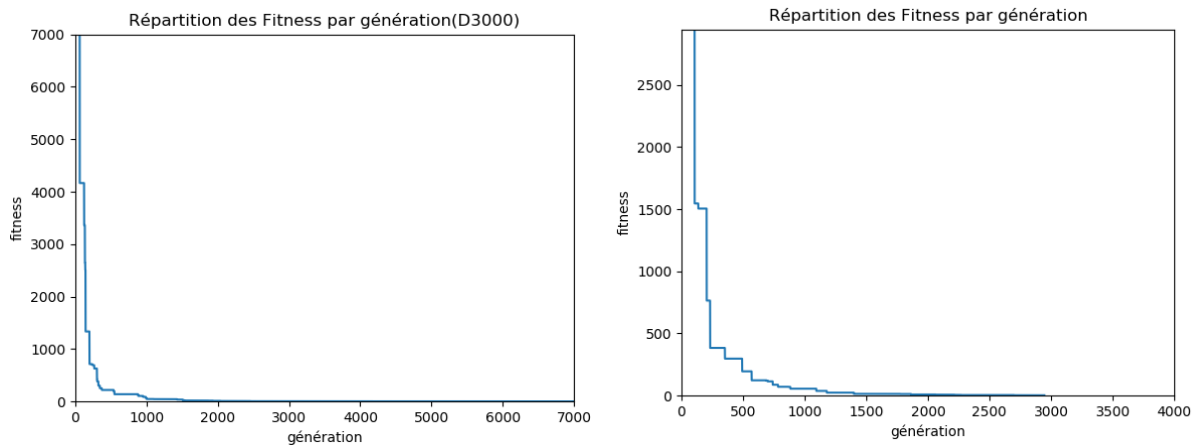


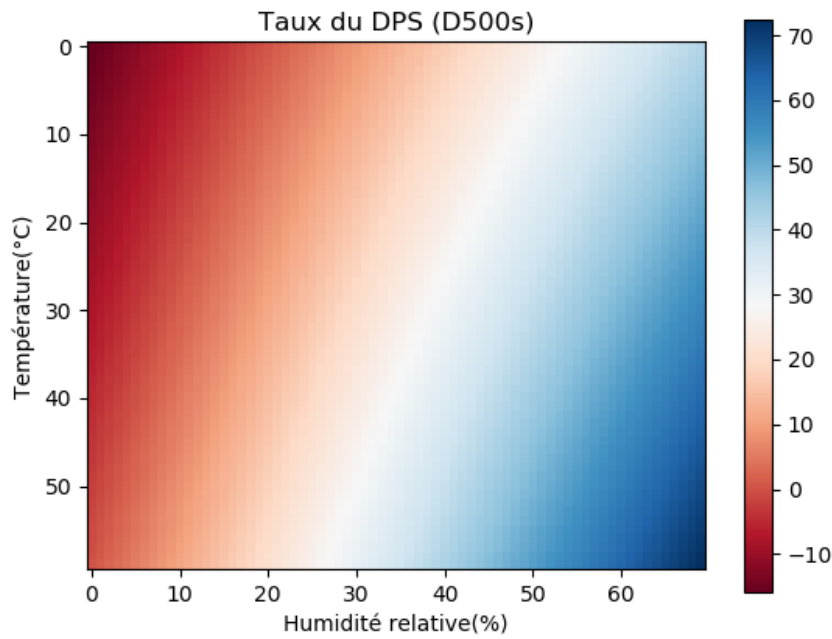
Figure IV.8. Evolution de la valeur de  $f_{obj}$  en fonction de nombre de générations (( $D_{3000s}$ ) et ( $D_{500s}$ )).

Une fois les coefficients sont déterminés, on établit les modèles mathématiques suivants [166]:

$$D_{500s} = 28.613165 + 0.056946 V_0^* + 2.259979 \Theta^* - 0.656613 RH^* - 0.00163 V_0^* \Theta^* - 0.001041 V_0^* RH^* + 0.052016 \Theta^* RH^* + 2.4^{-05} V_0^* \Theta^* RH^* \dots (16)$$

$$D_{3000s} = 49.651061 + 0.099568 V_0^* + 1.969208 \Theta^* + 1.237311 RH^* - 0.00222 V_0^* \Theta^* - 0.001578 V_0^* RH^* - 0.012898 \Theta^* RH^* + 3.4^{-05} V_0^* \Theta^* RH^* \dots (17)$$

Les deux modèles polynomiaux dans les deux intervalles du temps, on constate un effet considérable de la température sur le DPS contrairement à la quantité de la charge déposée et à l'humidité. Sur la figure IV.9, nous avons montré les résultats de la modélisation expérimentale par des courbes iso-réponse de taux de DPS ( $D_{500s}$ ,  $D_{3000s}$ ) en fonction de la température et l'humidité relative, en fixant le potentiel initial à -1400V.



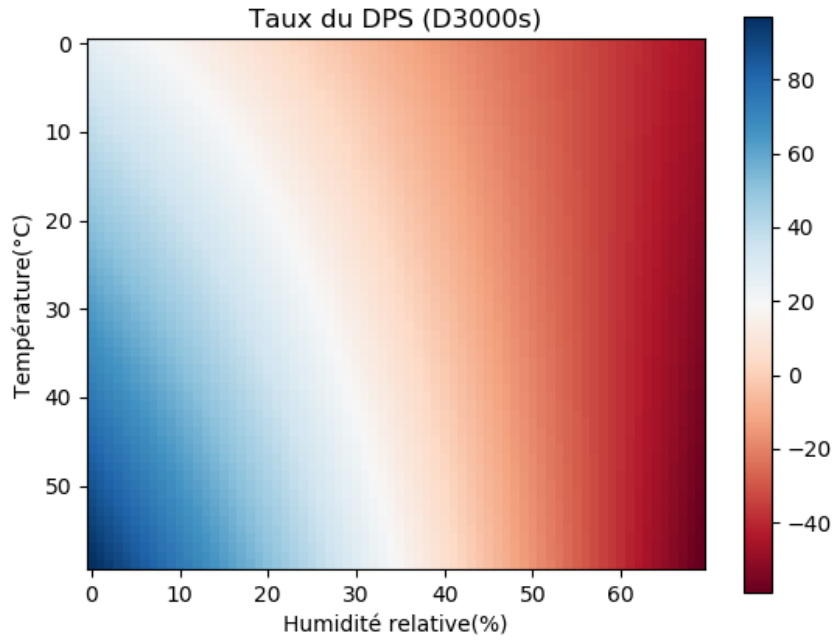


Figure IV.9. Taux du DPS prédit par ED en fonction de la température  $\theta$  et l'humidité relative  $RH$ : ( $D_{500s}$ ) et ( $D_{3000s}$ ).

Les figures IV.10 et 11 présentent l'influence des trois facteurs sur le déclin de potentiel. Dans chaque cas, les deux autres variables sont maintenues constantes et égales à leurs valeurs centrales  $V_0 = -1400$  V,  $\theta = 37.5$  C,  $RH = 65\%$ .

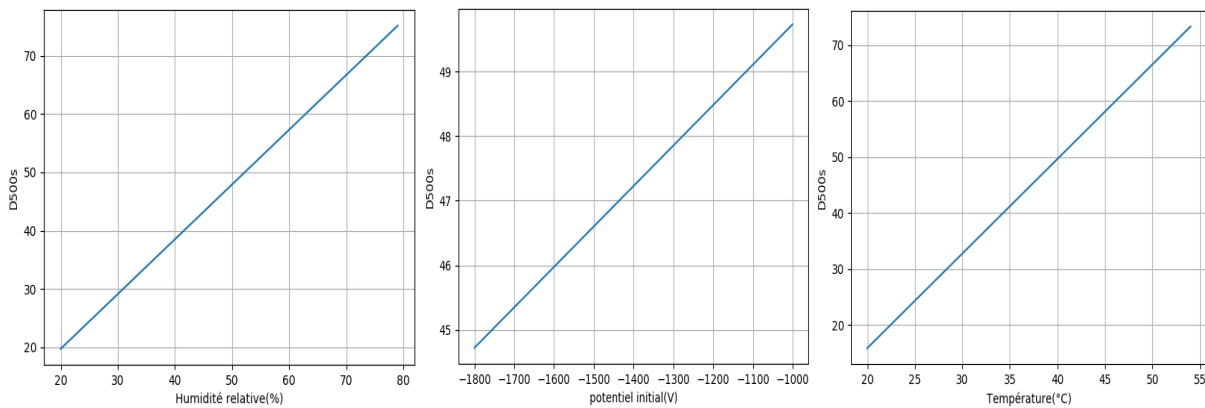


Figure IV.10. Réponses prédites ( $D_{500s}$ ) par ED en fonction des facteurs :  $V_0$ ,  $\theta$  et  $RH$ .

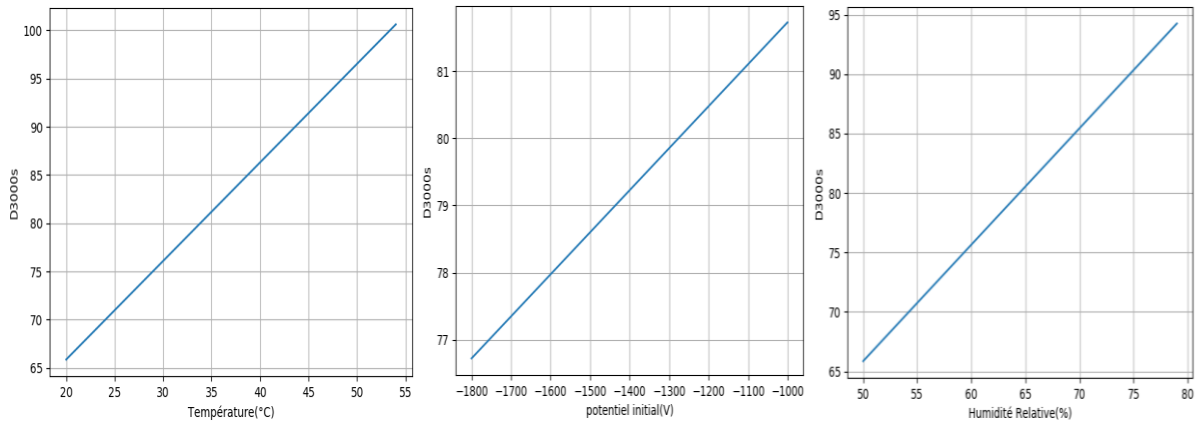


Figure IV.11. Réponses prédites ( $D_{3000s}$ ) par ED en fonction des facteurs :  $V_0$ ,  $\theta$  et RH.

Nous observons à court terme, les facteurs tels que la température et l'humidité influencent fortement le potentiel, avec des variations marquées. Cependant, à long terme, l'impact de ces facteurs devient beaucoup moins significatif, et le potentiel atteint un état quasi-stationnaire."

Cette évolution est logique, car à court terme, les facteurs environnementaux peuvent affecter la mobilité des charges, entraînant des changements notables dans le potentiel. En revanche, à long terme, les charges perdent de leur énergie et atteignent un état d'équilibre où leur mobilité est fortement réduite. Cela conduit à une stabilisation du potentiel, indépendamment des variations des facteurs extérieurs. Ce comportement est courant dans les systèmes où les charges sont piégées ou stabilisées dans des pièges de faible profondeur, limitant ainsi leur capacité à réagir aux variations des conditions externes.

## IV.12. Validation

Nous avons divisé nos résultats expérimentaux en deux sections. La première, représentant 80% des données, a été utilisée pour déterminer les coefficients à l'aide de l'algorithme d'évolution différentielle proposé et amélioré. Les 20 % restants ont servi à entraîner le modèle. En remplaçant les trois facteurs dans les modèles mathématiques obtenus, nous avons pu calculer le taux de DPS correspondant et le comparer aux résultats expérimentaux. Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous montrent une différence minimale, ce qui témoigne de la grande précision des résultats obtenus et de l'efficacité de l'algorithme proposé, qui améliore considérablement la méthode d'évolution différentielle.

Tableau IV.5 : Résultats de validation des modèles mathématiques avec DE.

|                          | Valeur prédite | Valeur Expérimentale | Précision | Temps d'exécution |
|--------------------------|----------------|----------------------|-----------|-------------------|
| <b>D<sub>500s</sub></b>  | 44.52516       | 45.94                | 0.9692    | 68s               |
| <b>D<sub>3000s</sub></b> | 73.08340       | 76.64                | 0.9535    | 95s               |

Par rapport aux résultats obtenus par les algorithmes génétiques, il est tout à fait clair que l'algorithme d'évolution différentielle amélioré détermine plus précisément le taux de déclin de potentiel pour les deux périodes  $D_{500s}$  et  $D_{3000s}$ .

En effet, afin de montrer la supériorité de cette approche, nous avons comparé les résultats obtenus en appliquant des algorithmes génétiques à ceux obtenus par la technique proposée. Cette supériorité se matérialise par le temps d'exécution et par la précision des résultats. Le tableau IV.6 illustre cette comparaison.

Tableau IV.6: Résultats de validation des modèles mathématiques avec GA.

|                          | Valeur prédite | Valeur Expérimentale | Précision | Temps d'exécution |
|--------------------------|----------------|----------------------|-----------|-------------------|
| <b>D<sub>500s</sub></b>  | 38.87431       | 45.94                | 0.8461    | 112s              |
| <b>D<sub>3000s</sub></b> | 67.33452       | 76.64                | 0.8806    | 185s              |

La figure IV.12 illustre l'évolution de la fonction "objectif" par le nombre de générations, cette figure montre qu'à court terme ( $D_{500s}$ ), l'algorithme génétique atteint la meilleure solution dans la génération 1500 après 112s. A long terme ( $D_{3000s}$ ), l'algorithme atteint la meilleure solution à la génération 3200 après 185 s, c'est un temps très long par rapport à celui obtenu par l'algorithme ED proposé.

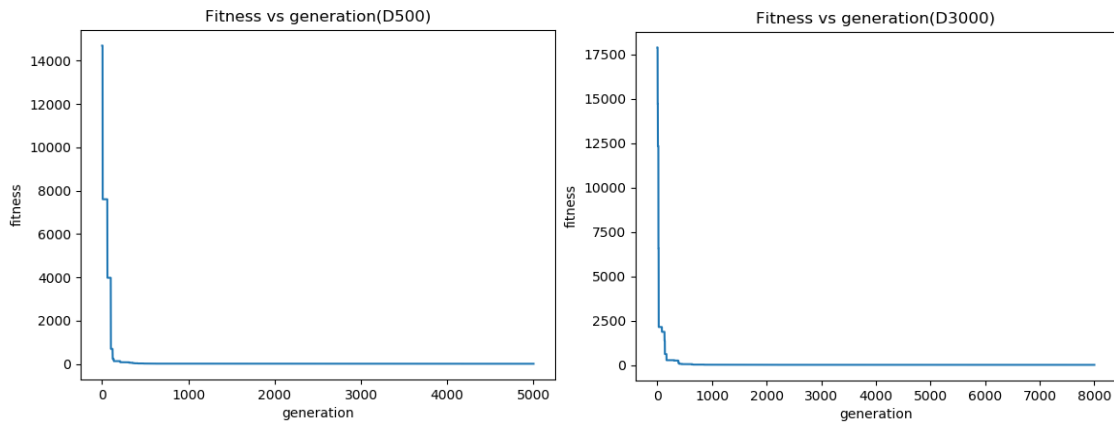


Figure IV.12. Evolution de la valeur de  $f_{obj}$  en fonction du nombre de générations ( $D_{500s}$ ) et ( $D_{3000s}$ ) obtenu par GA.

### IV.13. Conclusion

Cette étude a permis de comparer en profondeur deux approches d'optimisation, à savoir les algorithmes génétiques et l'algorithme à évolution différentielle. Tandis que les algorithmes génétiques offrent une méthode plus générale, l'algorithme modifié (EDA) s'est révélé plus adapté pour des problèmes spécifiques, comme l'optimisation du DPS dans les polymères.

L'algorithme à évolution différentielle présente des avantages notables, notamment en termes de rapidité et d'efficacité pour des problèmes complexes. Il s'est avéré puissant pour l'optimisation de fonctions complexes, particulièrement efficaces dans les problèmes où d'autres techniques ne peuvent pas être utilisées. Nous l'avons implanté pour l'optimisation du DPS, et il nous a permis de trouver la solution optimale, quelle que soit l'initialisation des facteurs influençant le DPS. Ainsi, la performance de l'algorithme modifié a été confirmée et validée. Cela conduit à penser qu'à l'avenir, notre version modifiée pourrait représenter un outil exceptionnel pour les chercheurs et les fabricants de polymères, leur permettant de traiter des problèmes de complexité accrue, non linéaire, avec un grand nombre d'essais, ainsi que des problématiques de maximisation et de minimisation sous contrainte.

# Conclusion Générale

---

Cette thèse a porté sur l'étude et la modélisation des phénomènes liés au déplacement des charges statiques à la surface des polymères, un sujet essentiel dans le domaine des matériaux isolants. L'objectif principal de ce travail était d'explorer l'efficacité des algorithmes évolutionnaires, en particulier les algorithmes génétiques et l'algorithme à évolution différentielle (DEA), pour l'optimisation des modèles mathématiques utilisés pour résoudre le déclin de potentiel en surface des polymères.

Dans ce contexte, nous avons d'abord introduit la méthode de décharge Couronne, un procédé important pour générer des charges sur la surface des polymères, et la méthode des plans d'expérience pour l'optimisation des paramètres influençant ce phénomène. Ces deux approches ont constitué la base de notre travail expérimental et ont permis de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre dans le déplacement des charges statiques. La méthode des plans d'expérience, en particulier, a été utilisée pour modéliser et optimiser les paramètres influençant le déclin de potentiel de surface.

Pour l'optimisation des modèles, une approche innovante a été développée en modifiant l'algorithme évolutionnaire standard, notamment l'algorithme à évolution différentielle, afin de l'adapter à notre problème spécifique. L'algorithme modifié DEA a permis de traiter efficacement des problèmes d'optimisation complexes, en offrant une convergence rapide vers la solution optimale, même en l'absence de paramètres de contrôle prédéfinis. La comparaison avec les algorithmes génétiques a mis en évidence les avantages de l'algorithme DEA, notamment sa capacité à résoudre des problèmes avec un grand nombre de variables, tout en minimisant le temps de calcul.

Les résultats obtenus montrent que l'algorithme modifié DEA représente un outil puissant pour l'analyse et la modélisation des phénomènes de déplacement des charges statiques sur la surface des polymères. Ce modèle a permis de quantifier l'impact des différents facteurs influençant le déclin de potentiel, tout en fournissant une meilleure compréhension des interactions complexes entre ces facteurs. De plus, cette étude a confirmé que l'algorithme DEA peut être appliqué avec succès à des problèmes de maximisation et de minimisation sous contrainte, offrant ainsi une solution robuste pour des problèmes industriels et scientifiques de grande envergure.

En conclusion, ce travail a permis de démontrer l'efficacité et la simplicité d'utilisation de l'algorithme modifié DEA pour résoudre des problèmes complexes dans le domaine des polymères, avec des implications significatives pour la recherche et les applications industrielles. L'intégration de la méthode de décharge Courone et des plans d'expérience dans le cadre de ce travail ouvre la voie à de futures investigations, notamment pour l'optimisation de nouveaux matériaux, ainsi que pour le traitement de problèmes encore plus complexes et non linéaires, avec un plus grand nombre de variables et de contraintes.

---

# Perspectives

---

Comme perspectives, on peut proposer d'approfondir l'utilisation de cet outil d'analyse par :

- Essayer d'autres facteurs, tels que l'épaisseur ou la polarité de la charge.
- Utiliser d'autres polymères dans des conditions plus agressives (conditions atmosphériques)
- Développer le stand expérimental pour une cartographie du DPS sur tout le film.
- Utiliser la méthode graphique de Llovera  $\log t(dv/dt) = f(\log(t))$  sur l'étude des pics.

# Bibliographies

---

- [1] P. Robert "Matériaux de l'électrotechnique Volume II" Edition Dunod. Presses Polytechniques Romandes 1987.
- [2] B. Du, Y. Gao "Dynamic behavior of surface charge on gamma-ray irradiated polybutylene" *Polymer Degradation and Stability* 94 (2009) pp 139-143.
- [3] P.K. Roy, P. Surekha, C. Rajagopal, R. Raman, V. Choudhary, " Study on the degradation of Low-Density Polyethylene in the presence of Cobalt Stearate and Benzil", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 99, pp. 236-243, 2006.
- [4] B. Pinel, F. Duchateau "Fonction isolation dans les matériels électriques", *Technique d'Ingénieur, Traité de génie électrique*, D2302, 1984.
- [5] S. LAFAYE, " Propriétés mécaniques de friction et de déformation des surfaces de polymères solides ", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg, Novembre, 2002.
- [6] Norme ISO 1043-1, «Plastiques - Symboles et termes abrégés - Partie 1: Polymères de base et leurs caractéristiques spéciales», 2001
- [7] S. Kalachnikov "Electricité" Edition de Moscou1980.
- [8] J.P.Mercier, W.Kurz, D.Zambelli " Introduction à la science des matériaux" Ed. Presse Polytechniques et universitaires Romandes. Ed.2002.
- [9] P. Lissac. " Propriétés viscoélastiques des polyéthylènes aux fréquences ultrasonores en relation avec leur structure et leur morphologie " Thèse d'université, Université de Lyon, Lyon, 1970.
- [10] G. Champetier, L. Monnerie. " Introduction à la chimie macromoléculaire " Edition Masson, Paris, 1970.
- [11] J. L. Halary et F. Lauprêtre, "De la macromolécule au matériau polymère ", Edition Belin, Paris, 2006.
- [12] E. Marechal, P.H. Geil, V.B. Gupta, Z. Bashir, "Handbook of thermoplastic polyesters". Volume 1: Homopolymers and copolymers, Edité par Stoyko Fakirov, WILEY-VCH, Allemagne, 753 p, 2002.
- [13] D.E. Kokkalas, D.N. Bikiaris, G.P. Karayannidis, « Effect of the Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst on the solid-state postpolycondensation of poly (ethylene terephthalate) », in *Journal of Applied Polymer Science*, volume 55, pp. 787-791, 1995.
- [14] S. Tate, Y. Watanabe, A. Chiba, « Synthesis of ultra-high molecular weight poly (ethylene terephthalate) by swollen-state polymerization », in *Polymer*, volume 34, pp. 4974-4977, 1993.
- [15] Ferry, J. D.. *Viscoelastic properties of polymers*, John Wiley & Sons, 1980.
- [16] Rajagopal,A., K. Ngai and S. Teitler. "Theoretical aspects of coupling model schemes of slow relaxation in complex correlated systems." *Journal of Non-Crystalline Solids* 131: 282-288, 1991.
- [17] Perez, J., J. Cavaille and J. Tatibouet. "La transition vitreuse dans les polymères amorphes." *Journal de chimie physique* 87(11-12): 1923-1967, 1990.
- [18] Turnbull, D. and M. H. Cohen. "Free - volume model of the amorphous phase: glass transition." *The Journal of chemical physics* 34(1): 120-125, 1961.
- [19] Fulchiron, R., C. Gauthier and G. Vigier. "Effects of the crystallinity on the beta relaxation of poly (ethylene terephthalate)." *Acta polymerica* 44(6): 313-315, 1993.
- [20] Illers, K. and H. Breuer. "Molecular motions in polyethylene terephthalate." *Journal of colloid science* 18(1): 1-31, 1963.
- [21] Lapersonne, P., D. I. Bower and I. M. Ward. "Molecular orientation and conformational changes due to uniaxial-planar deformation of poly(ethylene terephthalate) films." *Polymer* 33(6): 1277-1283, 1992.

- [22] Dargent, E., J. Grenet and X. Auvray. "Thermal behaviour of drawn semicrystalline poly (ethylene terephthalate) films." *Journal of Thermal Analysis* 41(6): 1409- 1415, 1994.
- [23] Asano, T., F. J. Baltá Calleja, A. Flores, M. Tanigaki, M. F. Mina, C. Sawatari, H. Itagaki, H. Takahashi and I. Hatta. "Crystallization of oriented amorphous poly (ethylene terephthalate) as revealed by X-ray diffraction and microhardness." *Polymer* 40(23): 6475-6484, 1999.
- [24] Bonart, R. "Parakristalline Strukturen in Polyäthylenterephthalat (PET)." *Kolloid- Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere* 213(1-2): 1-11, 1966.
- [25] Mahendrasingam, A., C. Martin, W. Fuller, D. Blundell, R. Oldman, J. Harvie, D. MacKerron, C. Riekel and P. Engström. "Effect of draw ratio and temperature on the strain-induced crystallization of poly (ethylene terephthalate) at fast draw rates." *Polymer* 40(20): 5553-5565, 1999.
- [26] Nicholson, T. M., G. R. Davies and I. M. Ward. "Conformations in poly (ethylene terephthalate): a molecular modelling study." *Polymer* 35(20): 4259-4262, 1994.
- [27] Welsh, G. E., D. J. Blundell and A. H. Windle. "A transient mesophase on drawing pol based on polyethylene terephthalate (PET) and polyethylene naphthoate (PEN)." *Journal of Materials Science* 35(20): 5225-5240, 2000.
- [28] Mahendrasingam, A., D. J. Blundell, A. K. Wright, V. Urban, T. Narayanan and W. Fuller (. "Observations of structure development during crystallisation of oriented poly (ethylene terephthalate)." *Polymer* 44(19): 5915-5925, 2003.
- [29] Kawakami, D., B. S. Hsiao, S. Ran, C. Burger, B. Fu, I. Sics, B. Chu and T. Kikutani. "Structural formation of amorphous poly (ethylene terephthalate) during uniaxial deformation above glass temperature." *Polymer* 45(3): 905-918, 2004.
- [30] Daubeny, R. d. P. and C. Bunn. The crystal structure of polyethylene terephthalate. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, 1954.
- [31] Sun, T., A. Zhang, F. Li and R. S. Porter. "Crystal lattice deformation and the mesophase in poly (ethylene terephthalate) uniaxially drawn by solid-state coextrusion." *Polymer* 29(12): 2115-2120, 1988.
- [32] Heuvel, H. and R. Huisman. "Effect of winding speed on the physical structure of as-spun poly (ethylene terephthalate) fibers, including orientation-induced crystallization." *Journal of Applied Polymer Science* 22(8): 2229-2243, 1978.
- [33] Thistlethwaite, T., R. Jakeways and I. Ward. "The crystal modulus and structure of oriented poly (ethylene terephthalate)." *Polymer* 29(1): 61-69, 1988.
- [34] Bellare, A., R. Cohen and A. Argon. "Development of texture in poly (ethylene terephthalate) by plane-strain compression." *Polymer* 34(7): 1393-1403, 1993.
- [35] Wunderlich, B. *Macromolecular physics*. vol. 1: Crystal structure morphology, defects, Academic Press 1973.
- [36] Jourdan, C. *Spectroscopie mecanique et alliages heterophases de polymeres: application a l'etude de systemes a base polypropylene*, Villeurbanne, INSA, 1987.
- [37] Fulchiron, R., C. Gauthier and G. Vigier. "Effects of the crystallinity on the  $\alpha$  relaxation of poly (ethylene terephthalate)." *Acta polymerica* 44(6): 313-315, 1993.
- [38] A. Launay, F. Thominette, J. Verdu, « Hydrolysis of poly (ethylene terephthalate): a kinetic study », in *Polymer Degradation and Stability*, volume 46, pp. 319-324, 1994.
- [39] H. Zimmermann, *Degradation and Stabilisation of polyesters*, *Developments in Polymer Degradation – 5*, N. Grassie. Applied Science, London, pp. 79-119, 1979.
- [40] N.S. Allen, M. Edge, M. Mohammadian, « Hydrolytic degradation of poly (ethylene terephthalate): importance of chain scission versus cristallinity », in *European Polymer Journal*, volume 27, n° 12, pp. 1373-1378, 1991.
- [41] B.J. Holland, J.N. Hay, « The thermal degradation of PET and analogous polyesters measured by thermal analysis-Fourier transform infrared spectroscopy », in *Polymer*, volume 43, pp. 1835-1847, 2002.

- [42] I. C. MC NEILL, M. Bounekhel, « Thermal Degradation Studies of Terephthalate Polyesters: 1- Poly (alkylene terephthalate) », in *Polymer Degradation and Stability*, volume 34, pp. 187-204, 1991.
- [43] B. Mortegne, « Vieillissement des composites – Evolution des propriétés et modélisation », *Techniques de l'Ingénieur*, rubrique Corrosion et vieillissement : phénomènes et mécanismes, COR 113, juillet 2005.
- [44] B. Mortaigne, V. Bellenger, J. Verdu, « Hydrolysis of styrene crosslinked unsaturated polyesters. Effect of chain ends », *Polymer Networks and Blends*, Vol. 2, No.4, pp. 187-195, 1992.
- [45] L. Hui, J.K. Nelson, L. S. Schadler, « Hydrothermal aging of XLPE/silica nanocomposites », *IEEE Conf. Elect. Insul. Dielec. Phen. (CEIDP)*, pp. 1 – 4, 2010.
- [46] L. Hui, J.K. Nelson, L. S. Schadler, « The influence of moisture on the electrical performance of XLPE/silica nanocomposites », *IEEE Int. Conf. Sol. Dielec. (ICSD)*, pp. 1 – 4, Potsdam (Germany), juillet 2010.
- [47] P. Rain, E. Brun, C. Guillermin, S. Rowe, « Hygrothermal Ageing of a Filled Epoxy Resin: Measurement of the Insulation properties and Qualitative Models », *IEEE Int. Conf. Sol. Dielec (ICSD)*, pp. 1 – 4, Potsdam (Germany), 2010.
- [48] Z.A. Mohd Ishak, J.P. Berry, « Effect of moisture absorption on the dynamic mechanical properties of short carbon fiber reinforced nylon 6,6 », *Polym. Compos.*, Vol. 15, No. 3, pp. 223-230, 1994.
- [49] I. Pires, « Aging in antifreeze of glass fiber reinforced polyamide », PhD thesis, University of Montpellier 2, 2000.
- [50] T. Czigany, Z.A. Mohd Ishak, T. Heitz, J. Karger-Kocsis, « Effect of hygrothermal aging on the fracture and failure behavior in short glass fiber-reinforced, toughened poly (butylene terephthalate) composites », *Eur. Polym. J.*, Vol. 37, No. 8, pp. 1635-1647, 2001.
- [51] T. Barany, J. Karger-Kocsis, T. Czigany, « Effect of hygrothermal aging on the essential work of fracture response of amorphous poly (ethylene terephthalate) sheets », *Polym. Degrad. Stab*, Vol. 82, No. 2, pp. 271-278, 2003.
- [52] D. K. Yang, W.J. Koros, H.B. Hopfenberg, V.T. Stannett, « The effects of morphology and hygrothermal aging on water sorption and transport in Kapton® polyimide », *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 31, No. 6, pp. 1619-1629, 1986.
- [53] M-H Han, J. A. Nairn, « Hygrothermal aging of polyimide matrix composite laminates », *Compos Part A – Appl. S.*, Vol. 31, No. 6, pp. 979-986, 2003.
- [54] M. P. Foulc, A. Bergeret, L. Ferry, P. Ienny and A. Crespy, « Study on hygrothermal ageing of glass fibre reinforced PET composites », *Polym. Deg. Stabl.*, Vol. 89, No. 3, pp. 461-470, 2005.
- [55] A. Ballara, J. Verdu, « Physical aspects of the hydrolysis of polyethylene terephthalate », *Polym. Degrad. Stab*, Vol. 26, No. 4, pp. 361-374, 1989.
- [56] W.T. Starr, « Polymer outdoor insulation », *IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul.*, Vol. 25, No. 1, pp. 125 - 136, 1990.
- [57] R. Hackam, « Outdoor HV Composite Polymeric Insulator », *IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul.*, Vol. 6, No. 5, pp. 557 – 585.
- [58] T. Tanaka, T. Iizuka, « Generic PD Resistance Characteristics of Polymer Nanocomposites », *IEEE Conf. Elect. Insul. Dielec. Phen. (CEIDP)*, pp. 1 – 4, 2010.
- [59] J. K. C. Kao, « Dielectric phenomena in solids », Elsevier Academic Press, ISBN:0-12-396561-6, 2004.
- [60] B. Tabet, « Contribution à la modélisation de dispositifs et la caractérisation de matériaux en électrotechnique », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2011.
- [61] K. L. Kaiser, « Electrostatic discharge », Taylor & Francis Group, ISBN 0-8493-7188- 0, 2006.
- [62] T. Hammi, « Étude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles », Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2005.

- [63] C. MENGUY, " Électricité statique : Principes. Problèmes. Applications, " Techniques de l'Ingénieur, D1035, pp. 1-25.
- [64] P. Llovera Segovia, " Étude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel. Nouveaux outils d'analyse, " Thèse de Doctorat, Université de Paris, 2002.
- [65] T. H. Pratt, " Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions, " Burgoyne Incorporated, Consulting Scientists & Engineers, Marietta, Georgia. ISBN 0-8169-9948-1, 2000.
- [66] M. Kachi, " Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires, " Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [67] A. Labergue, " Étude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements, " Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.
- [68] A. Crisci, " Etude du déclin de potentiel d'une surface chargée par une décharge électrique de type couronne, " Rapport pour maîtrise de physique LEMD, 1996.
- [69] P. Molinie. " Étude de la neutralisation de la charge électrique déposée par effet couronne à la surface d'un isolant. Application au suivi des premiers stades de vieillissement d'un isolateur époxyde, " Thèse de doctorat. Université de Paris, 1992.
- [70] P. Molinie, " Potential decay interpretation and insulating film: necessity of combining charge injection and slow volume polarisation processes, " Seven. Int. Conf. Of Diele. Mate. Meas, 1996.
- [71] P. Molinie, M. Goldman and J. Gatellet, " Surface potential decay on corona charged epoxy samples due to polarization processes, " J. Phys. D : App. Phys, vol. 28, pp. 1606-1610, 1995.
- [72] R. Coelho, L. Levy, D. Serrail, " On the natural decay of corona charged Teflon sheet I, " IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1033-1037, 1984.
- [73] P. Llovera, P. Molinié, " New methodology for surface potential decay measurements application to study charge injection dynamics on polypropylene films, " IEEE. Trans. Diele. Elec. Ins, vol. 11, pp. 1049-1056, 2004.
- [74] M. Remadnia, M. Nemamcha et L. Herous, "Etude du Déclin de Potentiel d'une Surface Chargée par une Décharge Electrique de Type Couronne", 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, Sétif, 03-04 Novembre 2007.
- [75] J. Lowell, "Surface conduction and absorption currents in polymers", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.15, pp. 109-117, 1982.
- [76] Z. Ziari, "Etude de l'effet d'un traitement par plasma froid sur les propriétés de surface d'un film de polymère", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, Mars 2008.
- [77] M. Ieda, G. Sawa and U. Shinohara, "A decay process of surface electric charges across polyethylene film", J. Appl. Phys., Vol. 6, pp. 793-794, 1967.
- [78] J. A. Giacometti and O. N. Oliveira Jr., "Corona Charging of Polymers", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 27, N° 05, pp. 924-943, 1992.
- [79] H. Von. Berlepsch. « Interpretation of surface potential kinetics in HDPE by a trapping model » J. Phys. D, App. Phy, N°18. pp.1155-1170, 1985.
- [80] I. P. Batra, K.D. Kanazawa and H. Seki, "Discharge characteristics of photoconducting insulators", J. Appl. Phys., Vol. 41, pp. 3416-3422, 1970.
- [81] T. J. Sonnonstine and M. M. Perlman, "Surface potential decay in insulators with field dependent mobility and injection efficiency", J. Appl. Phys., Vol. 46, N° 9, pp. 3975-3981, 1975.
- [82] E. A. Baum, T. J. Lewis and R. Toomer, "Decay of electrical charge on polyethylene films", J. Phys. D., Vol. 10, pp. 487-497, 1977.
- [83] M. M. Perlman, K. J. Kao and S. Bamji, "The effect of corona generated excited molecules on surface potential decay in polyethylene", in Proc. Int. Workshop on Electric Charges in Dielectrics, Kyoto, pp. 3-9, 1978.

- [84] E. A. Baum, T. J. Lewis, R. Toomer, "Further observations on the decay of potential corona charged polyethylene films," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 10, pp. 2525-2531, 1977.
- [85] B. Tabti, M. R. Mekideche, M. Plopeanu, L.M. Dumitran, L. Herous, et L. Dascalescu, "Corona charging and charge decay characteristics of nonwoven filter media," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, N° 2, pp.634-640, 2010.
- [86] L. Dascalescu, A. Mihalcioiu, A. Stochita, and P. V. Notingher, "Charge- Decay Characteristics of Granular Materials Forming Monolayers at the Surface of Grounded Electrodes," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, , pp. 20 - 24, 2008.
- [87] L. Herous, M. Remadnia, M. Kachi and M. Nemamcha, "Decay of Electrical Charges on Polyethylene Terephthalate Surface," J. Eng. Sci. Technol, vol.2, pp. 87-90, 2009.
- [88] M. Remadnia, M. Nemamcha, L. Herous and L. Dascalescu, "Decay of the Electric Potential at the Surface of Corona-charged Uniform Layers of HIPS Granules," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 2, 2011.
- [89] K. C. Kao, « Dielectric phenomena in solids », Elsevier Academic Press, ISBN: 0-12-396561-6, 2004.
- [90] R. Fournie, R. Coelho, « Dielectriques : Bases theoriques », Techniques de l'Ingénieur, D2300, pp.1-18.
- [91] R. Coelho, B. Aladenize, « les dielectriques ; proprietes dielectriques des materiaux isolant », Editions Hermès, ISBN 2-86601-383-2, 1993.
- [92] P. Molinie, « Comment modeliser un isolant en electrostatique? Approches classiques et modernes d'un probleme complexe. », 5ème Congrès de la Société Française d'Electrostatique, Grenoble, France, 2006.
- [93] P. Molinie, D. Alvarez, « Etude de l'injection de charge sur des plaques d'elastomere silicone par mesures du potentiel de surface », Revue Internationale de Génie Electrique Vol.9, pp.389-404, 2006.
- [94] P. Molinie, « Measuring and Modeling Transient Insulator Response to Charging: the Contribution of Surface Potential Studies », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.12, No.5, 2005.
- [95] P. Molinie, M. Goldman and J. Gatellet, « Surface potential decay on coronacharged epoxy samples due to polarization processes », Journal of Physics D: Appl. Phys, Vol.28, pp.1601-1610, 1995
- [96] H. Alghamdi, "A Study on the Ageing of polymeric materials in the presence of space charge," These de doctorat de l'universite de southampton, 2016.
- [97] L. H. Sperling, "Introduction to physical polymer science," 4th ed.: John Willey & Sons, 2006.
- [98] DM. Taylor, T.J. Lewis, "Electrical conduction in polyethylene terephthalate and polyethylene films," J.Phys D: Appl.Phys. vol. 4, pp. 1346-1357, 197.
- [99] AC. Lilly, JR. Mc Dowell "High-field conduction in films of mylar and teflon," J. Appl. Phys. vol. 39, pp. 141-146, 1968.
- [100] D. Das-Gupta "Conduction mechanisms and high-field effects in synthetic insulating polymers," IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul. vol. 4, pp. 149-156, 1997.
- [101] Y. Segui "Diélectriques, Courants de conduction, " Techniques de l'Ingénieur, vol. D-2301, pp. 1-12, 2000.
- [102] R.H. Fowler, L. Nordheim, Porc. R. Soc. À, vol. 119, pp. 173, 1928.

- [103] V. Adamc, JH. Cloderwood “Electrical conduction and polarisation phenomena in polymeric dielectrics at low fields” J. Phys. D, Vol 14, 1487,1981.
- [104] D.M. Taylor, “Measuring techniques for electrostatics”, Journal of Electrostatics Vol.51-52, pp.502-508, 2001.
- [105] W.E. Vosteen, “A Review of Current Electrostatic Measurement Techniques and their Limitations”, Electrical Overstress Exposition, 24-26 Avril, San Jose California, 1984.
- [106] M. Briere, J. Weill, « L’électrometre a Condensateur Vibrant », Le Journal de Physique et le Radium, Tome 16, pp.695-703,1955.
- [107] A. Fritsch, « Potentiometre a lame vibrante pour la mesure et l’enregistrement des potentiels de surface de couches monomoleculaires », Le Journal de Physique et Le Radium, Physique Appliquée, Tome 22, pp.183-185, 1961.
- [108] M. Dukic, « Vibrating Kelvin Probe Measurements Of a Silicon Surface With The Underside Exposed To Light », Thesis, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [109] S. KASRI, « Etude et Modélisation de Déclin de Potentiel de Surface par les Réseaux de Neurones » These de Magister de l’universite Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [110] A. Godzik. Approches évolutionnaires pour la robotique modulaire et anticipatoire. Thèse de doctorat. Dept. Informatique., Paris XI Univ ., Paris , 2005.
- [111] A. E. Eiben & J. E. SMITH. Introduction to Evolutionary Computing. Berlin: Springer Verlag, Heidelberg, 2003
- [112] Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press: Ann Arbor, 1975.
- [113] D.E Goldberg, « Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning ». Addison-Wesley: Reading, MA, 1989.
- [114] A. Wright, « Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization », pp. 205–218. Morgan Kaufmann: San Mateo, CA, 1991.
- [115] L. Davis, Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinhold: New York, 1991.
- [116] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms. Springer-Verlag : New York, 1992.
- [117] PJB. Hancock, “Selection methods for evolutionary algorithms”. In : Chambers, L. (Ed.) Practical Handbook of Genetic Algorithms : New Frontiers, Vol. II, CRC Press, Boca Raton, FL, 67-92, 1996.
- [118] Gendreau, M. An introduction to tabu search. In : Glover, F. & Kochenberger, G.A. (eds.), Handbook of metaheuristics, Kluwer’s International Series, 37-54, 2003
- [119] Henderson, D., Jacobson, S.H. & Johnson, A.W. The theory and practice of simulated annealing. In : Glover, F. & Kochenberger, G.A. (eds.), Handbook of metaheuristics, Kluwer’s International Series, 287-319, 2003
- [120] Jeffries, N.O. Performance of a genetic algorithm for mass spectrometry proteomics. BMC Bioinformatics, 5(180), 2004.

- [121] Leardi, R. Application of genetic algorithm-PLS for feature selection in spectral data sets. *Journal of Chemometrics*, 14, 643-655, 2000.
- [122] Pittman, J. Adaptive Splines and Genetic Algorithms. *Journal of Computational & Graphical Statistics*, 11(3), 615-638, 2002.
- [123] Reeves, C.R. Genetic algorithms and neighbourhood search. In: Fogarty, T.C. (Ed.) *Evolutionary Computing : AISB Workshop, Leeds, UK, April 1994 ;Selected Papers*. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [124] Reeves, C.R. A genetic algorithm for flowshop sequencing. *Computers & Operations research*, 22, 5-13, 1995
- [125] Reeves, C.R. Fitness landscapes and evolutionary algorithms. In : Fonlupt, C., Hao, J.K., Lutton, E., Ronald, E. & Schoenauer, M. (Eds.) *Artificial Evolution : 4th European Conference ; Selected Papers*. Springer-Verlag, Berlin, 3-20, 2000.
- [126] CR. Reeves, JE. Rowe, “Genetic algorithms - Principles and perspectives”, *A guide to GA theory*, Kluwer Academic Publishers, London, 2003.
- [127] C. Reynes, S. Souza, R. Sabatier, G. Figueres, B. Vidal, “Selection of discriminant wavelength intervals in NIR spectrometry with genetic algorithms”. *Journal of Chemometrics*, 20, 136-145 (2007a).
- [128] C. Reynes, S. Roche, L. Tiers, R. Sabatier, P. Jouin, N. Molinari, S. Lehmann, “Comparison between surface and bead based MALDI profiling technologies using a single bioinformatics algorithm”. *Clinical Proteomics (sous presse)* (2007b).
- [129] MD. Vose, “Generalizing the notion of schema in genetic algorithms”. *Artificial Intelligence*, 50, 385-396,1988.
- [130] J. Dréo, A. Pérowski, P. Siarry, and E. Taillard. *Métaheuristiques pour l’Optimisation Difficile*. Eyrolles. ISBN : 2-212-11368-4, 2003.
- [131] JT. Alander, “An indexed bibliography of genetic algorithms in economics”, *Technical Report Report Series No. 94-1-ECO*, Department of Information Technology and Production Economics, University of Vaasa, <http://www.uvasa.fi/~jal/2001>.
- [132] R. Storn , K. Price. Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization* 11(4), 341- 359 (1997)
- [133] AE. Eiben, JE. SMITH. “Introduction to Evolutionary Computing. Berlin” : Springer Verlag, Heidelberg, 2003.
- [134] K. V. Price., R. M. Storn. & J. A. Lampinen. *Differential Evolution : A practical Approach to global Optimization*. Heidelberg ,Berlin : Springer Verlag, 2005

- [135] D. Karaboga. & S. Okdem. A simple and global optimization algorithm for engineering problems: Differential Evolution Algorithm. TUBITAK, 1: 53–60, 2004.
- [136] S. Kannan., S. Mary. & N. Padhy. Application and comparison of metaheuristic Techniques to generation expansion planning problem. IEEE Trans. on power systems, 2005.
- [137] J. Lampinen. & Y. Zelinka. On stagnation of the differential evolution algorithm. in Proc.MENDEL Conf: 76-83, 2000.
- [138] Z. Ziari, S. Sahli, A. Bellel, Y. Segui, P. Raynaud Surface potential decay of polyimide films, ALAzhar Bulletin of Science, 16 (2), 73-80, 2005.
- [139] K. Rougdia, L. Herous, A. Fatihou, B. Tabti, M. Nemamcha, L. Dascalescu “Experimental Modelling of the electric potential decay at the surface of polypropylene”, Journal of Electrostatics, Volume 76, Pages 262-267, 2015.
- [140] K. Rouagdia, M. Nemamcha, L. Herous, L. Dascalescu, H. Mellouki “Surface Potential Decay of DC-corona-charged PET Films on Humid Electrodes”, Journal of Electrostatics, Volume 78, Pages 17-21, 2015.
- [141] S. Kasri, L. Herous “Neuronal approach for estimating surface potential decay in polyethylene terephthalate”, International Conference on Technological Advances in Electrical Engineering, Skikda ICTAEE’18, 2018.
- [142] S. Kasri, L. Herous, “Modélisation de déclin de potentiel de surface d’un polymère (PET) par réseaux de neurones artificiels”, 4èmes Journées Internationales de Chimies Organique, Annaba JICOA’18. 2018.
- [143] E. Canessa, S. Chaigneau, “Response surface methodology for estimating missing values in a pareto genetic algorithm used in parameter design”, Ingeniería e Investigación, v37, n2, 89-98. 2017.
- [144] Optimization, Heidelberg, Berlin : Springer Verlag. 2005.
- [145] M. Remdania, L. Herous, M. Nemamcha, “Contribution à l’analyse de l’évolution de la charge déposée sur la surface des polymères par décharge couronne”, Proc. ICEEA, Sidi Bel-Abbès, p. 215-218. 2008.
- [146] L. Herous, M. Nemamcha, M. Remadnia, D. Dascalescu, “Factors that Influence the Surface Potential Decay on a Thin Film of Polyethylene Terephthalate (PET)”, Journal of Electrostatics, Vol 67, pp: 198-202. 2009.
- [147] K. Smili, L. Herous, “Corona Charging and Charge Decay on Polyethylene Terephthalate Films (PET)”, in : Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA), Vol. 67, no.3, pp.81-90, ISSN 1582-5175. 2019.
- [148] J. Brest, S. Greiner, B. Boskovic, M. Mernik, V. Zumer, “Self adapting control parameters in differential evolution: a comparative study on numerical benchmark problems”, IEEE Trans Evol Comput 10(6):647–657. 2006.
- [149] S. Rahnamayan, HR. Tizhoosh, MMA. Salama, “Opposition-based differential evolution”, IEEE Trans Evol Comput 12(1):64–79. 2008.
- [150] AK. Qin, VL. Huang, PN. Suganthan, “Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization”, IEEE Trans Evol Comput 13(2):398–417. 2009.

- [151] X. Li, J. Wang, J. Zhou, M. Yin, “A perturb biogeography based optimization with mutation for global numerical optimization”, *Appl Math Comput* 218(2):598–609. 2011.
- [152] F. Neri, V. Tirronen, “Scale factor local search in differential evolution”, *Memet Comput J* 1(2):153–171. 2009.
- [153] JQ. Zhang, AC. Sanderson, “adaptive differential evolution with optional external archive”, *IEEE Trans Evol Comput* 13(5):945–958. 2009.
- [154] J. Wilfrido, G. Paredes, CT. Eduardo, “Differential evolutionary algorithm in the construction process of optimal experimental designs”, *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 46, 10, 2017.
- [155] D. Karaboga, S. Okdem, “A simple and global optimization algorithm for engineering problems”: Differential Evolution Algorithm, *TUBITAK*, 1: 53–60. 2004.
- [156] H. Qin, JZ. Zhou, YL. Lu, YH. Li, YC. Zhang, “Multi-objective cultured differential evolution for generating optimal trade-offs in reservoir flood control operation”, *Water Resour, Manag* 24(11):2611–2632. 2010.
- [157] R. Sheikholeslami, A. Kaveh . “A Survey of Chaos Embedded Meta-Heuristic Algorithms”, *Int. J. Optim. Civil. Eng.* 3(4), 617-633, 2013.
- [158] P. Notingher jr., S. Agnel, P. Molinié, A. Sylvestre, M. Olariu, J. Castellon, A. Toureille, A. Petre, “Etude des charges d’espace dans le polyéthylène téréphtalate soumis a des forts champs électriques”, *Conférence Matériaux pour le Génie Electrique*, Lyon. 2005.
- [159] B. Hadri, PR. Mamy, J. Martinez, M. Mostefa, “Electrical conduction in semicrystalline polyethylene terephtalate in high electric field”, *Solid State Communication (Elsevier)* 139, 35-39. 2006.
- [160] L. Huanzhe, L. Kungi, L. Xia,. A comparative study of artificial bee colony, bees algorithm and differential evolution on numerical benchmark problems, *Appl Math Comput* 107:198–207, 2010.
- [161] Y. Zhang, D. Zhou, “Application of differential evolution algorithm in future collider optimization”, In: *Proceedings of IPAC*. pp. 2–4. 2016.
- [162] H. Wen, S. Hou, Z. Liu, Y. Liu “An optimization algorithm for integrated remanufacturing production planning and scheduling system”, *Chaos, Solutions Fractals* 105:69–76. 2017.
- [163] B. Bentouati, S. Chettih, R. Esehimi, “A Chaotic Firefly Algorithm for non-convex Economic Dispatch problem”, in *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, vol. 60, no. 1, pp. 172-179, ISSN 1582-5175. 2017.
- [164] X. Li, M. Yin, Application of differential evolution algorithm on self-potential data, *PLoS One* 7(12):e51199. 2012 b.

- [165] A. Whitley. "Genetic Algorithm Tutorial", Technical Report CS-93-103, Colorado State University, Department of Computer Science, 1993.
- [166] S. Kasri, L. Herous, , K. Smili, , MT. Kimour, A. Dekhane, "Potential Decay Simulation on Insulating Films" Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol.59, no.5, pp.58-71, 2022.