



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N°d'ordre:M../GE/2024

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Par

Mr BACHELILI Mahieddine

Mr TIRKA Ismail

La détection des défauts électriques dans le réseau du tramway de Mostaganem par les méthodes de l'intelligence artificielle

Soutenu le 27/06/ 2024 devant le jury composé de :

Présidente :	Mr HENNI Sidahmed	Pr	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr MESKIN Said	Pr	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mme GHOMRI Leila	MCA	Université de Mostaganem
Co-encadreur :	Dr.SOUAG Sliman		Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

DEDICACE

 **À nos chers parents**

**Votre amour inconditionnel, votre soutien constant et vos sacrifices ont été
la source même de ma force tout au long de ce parcours...**

 **À nos frères et sœurs**

**Votre soutien moral et votre compréhension pendant les moments de
pression ont été précieux.**

 **À nos amis proches**

**BOUHRIR Mustapha ; GHANEM Maamer ; FOUR Boumediene ; BOUGAILA Habib ;
DJEBOUR Ali ; FELLAH Rachid ; DJAWED Abdeldjalil ; BELHADJI Hanane.**

 **À mes professeurs et encadrants**

Dr : GHOMRI Leila

Dr : SOUAG Sliman

Mr. Flih Abdelhak

Chargé system LAC : MOHRA YACINE

Chargé système CFO : BENZAZA Zohir

Chargé ordonnancements OPP : OGADI Imen

**Votre soutien indéfectible en faveur de l'apprentissage et du progrès scientifique est une
source d'inspiration constante.**

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Mme GHOMRI Leila, notre encadreur de mémoire, pour son soutien continu, ses conseils éclairés et sa patience tout au long du développement de cette thèse. Ses précieuses suggestions et expériences ont été essentielles à la réussite de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à Mr. MOHRA Yacine et Mr. BENZAZA Zohir, pour leurs conseils avisés et leurs encouragements sincères. Leur disponibilité et leurs critiques constructives ont grandement enrichi ce projet.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à l'équipe SETRAM pour nous avoir fourni les ressources nécessaires à la réalisation de cette recherche. Les échanges enrichissants avec mes collègues ont été inspirants et motivants.

Mes remerciements s'adressent également à notre membres Jury

Dr. HENNI Sidahmed

Dr. MESKIN Said

Un merci tout spécial à nos proches et à nos familles pour leur soutien et leur compréhension sans faille tout au long de cette période scolaire.

Leurs encouragements et leur amour ont été mes piliers dans cette aventure académique.

Enfin, nous ne pouvons qu'adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de cette thèse.

ملخص

نستكشف في هذا البحث تطبيق الذكاء الاصطناعي في الاكتشاف المبكر وتصنيف الأعطال الكهربائية في أنظمة الترام والهدف هو تحسين الصيانة الوقائية وضمان سلامة وموثوقية العمليات.

قمنا بتطوير نظام يعتمد على تقنيات التعلم الآلي ومعالجة الإشارات لتحليل البيانات الكهربائية من معدات الترام. تم استخدام الخوارزميات المتقدمة مثل الشبكات العصبية العميقة لاكتشاف وتصنيف الشذوذات الكهربائية.

تظهر نتائجنا أن النهج القائم على الذكاء الاصطناعي يمكن أن يحدد بدقة مجموعة من الأعطال الكهربائية، بما في ذلك الدوائر القصيرة، وتغيرات الجهد، والشذوذات الحالية. لقد حصلنا على دقة كشف قدرها 99.0%، مما يدل على فعالية النظام المقترح.

وتسلط المناقشة الضوء على أهمية الكشف المبكر عن الأعطال الكهربائية لمنع الأعطال وتقليل تكاليف الصيانة. نناقش أيضاً التحديات التي نواجهها والتحسينات المحتملة للتنفيذ الأوسع لهذه التكنولوجيا في أنظمة النقل الأخرى وتشمل الآثار العملية تقليل أوقات التوقف غير المخطط لها، وتحسين جداول الصيانة، وتحسين موثوقية خدمات الترام بشكل عام.

نوصي بمواصلة تطوير نماذج الذكاء الاصطناعي وتحسينها لاكتشاف الأعطال الكهربائية بشكل أكثر دقة وسرعة. ويوصى أيضاً بالتعاون مع سلطات الصناعة والنقل من أجل التنفيذ الناجح على نطاق واسع.

وفي الختام، تبين هذه الأطروحة أن الذكاء الاصطناعي يقدم حلاً واعداً لتحسين إدارة الأعطال الكهربائية في خطوط الترام. يمكن أن يؤدي تطبيق هذه التقنيات إلى تحسين توفر المركبات وزيادة السلامة للركاب والمشغلين.

RESUME

Dans ce mémoire, nous explorons l'application de l'intelligence artificielle (IA) pour la détection précoce et la classification des défauts électriques dans les systèmes de tramway.

L'objectif est d'améliorer la maintenance préventive et d'assurer la sécurité et la fiabilité des opérations.

Nous avons développé un système basé sur des techniques d'apprentissage automatique et de traitement du signal pour analyser les données électriques provenant des équipements de tramway. Des algorithmes avancés tels que les réseaux de neurones profonds ont été utilisés pour détecter et classifier les anomalies électriques.

Nos résultats montrent que l'approche basée sur l'IA peut identifier avec précision une gamme de défauts électriques, y compris les courts-circuits, les variations de tension et les anomalies de courant. Nous avons obtenu une précision de détection de 99.0 %, démontrant l'efficacité du système proposé.

La discussion met en lumière l'importance de la détection précoce des défauts électriques pour prévenir les pannes et réduire les coûts de maintenance. Nous discutons également des défis rencontrés et des améliorations potentielles pour une mise en œuvre plus large de cette technologie dans d'autres systèmes de transport.

Les implications pratiques incluent la réduction des temps d'arrêt non planifiés, l'optimisation des calendriers de maintenance et l'amélioration globale de la fiabilité des services de tramway.

Nous recommandons de continuer à développer et à affiner les modèles d'IA pour une détection encore plus précise et rapide des défauts électriques. Des collaborations avec l'industrie et Les autorités de transport sont également recommandées pour une mise en œuvre Réussie à grande échelle.

En conclusion, ce mémoire montre que l'intelligence artificielle offre une solution prometteuse pour améliorer la gestion des défauts électriques dans les tramways. L'application de ces technologies peut conduire à une meilleure disponibilité des véhicules et à une sécurité accrue pour les passagers et les opérateurs.

SUMMARY

In this dissertation, we explore the application of artificial intelligence for early detection and classification of electrical faults in tram systems.

The objective is to improve preventive maintenance and ensure the safety and reliability of operations.

We developed a system based on machine learning and signal processing techniques to analyze electrical data from tram equipment. Advanced algorithms such as deep neural networks have been used to detect and classify electrical anomalies.

Our results show that the AI-based approach can accurately identify a range of electrical faults, including short circuits, voltage variations and current anomalies. We obtained a detection accuracy of 99.0%, demonstrating the effectiveness of the proposed system.

The discussion highlights the importance of early detection of electrical faults to prevent breakdowns and reduce maintenance costs. We also discuss the challenges faced and potential improvements for broader implementation of this technology in other transportation systems.

Practical implications include reducing unplanned downtime, optimizing maintenance schedules and overall improving the reliability of tram services.

We recommend continuing to develop and refine AI models for even more accurate and rapid detection of electrical faults. Collaborations with industry and transport authorities are also recommended for successful large-scale implementation.

In conclusion, this thesis shows that artificial intelligence offers a promising solution to improve the management of electrical faults in tramways. The application of these technologies can lead to improved vehicle availability and increased safety for passengers and operators.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE I	
1. Introduction	5
1. Le Tramway	5
1.1 Principe de fonctionnement	5
1.2 Historique du Tramway.....	6
1.3 Les grands acteurs du monde ferroviaire.....	6
1.4 Les avantages et les inconvénients du Tramway	7
2. Tramway de Mostaganem	8
2.1 La société d'exploitation du tramway SETRAM	9
2.2 Les objectifs de l'entreprise	10
2.3 Les différents Tramway d'Algérie en services (par couleur de ram).....	10
3. La Maintenance du Tramway	11
4. Description générale de réseau du Tramway	12
4.1 Réseau de traction en ligne	12
4.2 Réseau d'énergie	13
5. Conclusion.....	14
CHAPITRE II	
1. Introduction.....	16
2. Généralités sur les réseaux électriques	16
2.1 Fournisseur d'énergie.....	17
2.2 Les caractéristiques d'un réseau électrique	18
3. Les infrastructures statiques du système de Tramway	19
4. Le réseau électrique du Tramway de Mostaganem	19
4.1 Poste Haute Tension (PHT).....	19
4.1.1 Les éléments constituant la poste HT	20
4.2 Les Sous station de traction (SST)/(SSR)	26
4.2.1 L'interface de la sous-station	26
4.2.2 Les équipements de la sous-station.....	27
4.3 Alimentations par le sol (APS-LAC)	29
4.3.1 Alimentation par le sol (APS).....	30
4.3.2 La ligne aérienne de contact (LAC)	30
4.3.3 Les caractéristiques de la LAC	31
4.4 Sous-système SCADA (Poste de contrôle centralisé).....	32
5. Les défauts électriques dans les systèmes de tramway	33

5.1 Les caractères des défauts.....	33
5.2 Les différents défauts du Tramway	34
5.2.1 Le courant de fuite	34
5.2.2 Les coups de foudre	35
5.2.3 Les surintensités à taux de montée	37
5.2.4 Défauts à la terre	37
5.2.5 Le court-circuit.....	39
5.2.6 Le choc électrique.....	39
6. La maintenance du Tramway	40
6.1 Les concepts	41
6.2 Les opérations de maintenance	42
7. Conclusion.....	43

CHAPITRE III

1. Introduction.....	45
2. Généralité sur Les relais de protection	45
3. Les Méthodes de détection des défauts électrique dans le système Tramway	47
3.1 Méthodes standard.....	47
3.2 Méthode de l'intelligence artificiel IA	53
4. Conclusion	56

CHAPITRE IV

1. Introduction.....	58
2. Modélisation et simulation.....	58
3. Le programme utilisé.....	65
4. Les définitions	65
4.1 Apprenant en classification (Classification Learner)	65
4.2 Ingénierie des fonctionnalités (Feature Engineering)	65
5. Les méthodes de classification.....	66
5.1 Transformer des entités avec PCA dans Apprenant en classification.....	66
5.1.1 Les avantages PCA	66
5.2 Comprendre la validation croisée	68
5.3 Classification KNN.....	68
5.4 Matrice de confusion.....	68
5.4.1 Matrice de confusion pour la classification binaire	69
6. SCATTER	70
7. ROC courbe	71
8. L'analyse discriminante quadratique (QDA).....	72
9. Résultats de classification	72
10. Résultats de comparaison final	73

11 Conclusion 74

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale..... 76

REFERENCES..... 77

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Tramway en 1920 et en 2022	6
Figure I.2 : Tramway de Mostaganem.....	8
Figure I.3 : Organigramme de SETRAM	9
Figure I.4 : Les 7 Tramways d'Algérie en service	10
Figure I.5 : La maintenance de SETRAM	11
Figure I.6 : La maintenance de CITAL.....	11
Figure I.7 : Schéma de réseau de traction du tramway de Mostaganem.....	12
Figure I.8 : schéma de distribution d'énergie	13

CHAPITRE II

Figure II.1 : Poste de transformation de SONELGAZ à Mostaganem.....	17
Figure II.2 : Schéma unifilaire d'un réseau électrique	18
Figure II.3 : Réseau du Tramway.....	19
Figure II.4 : Vue d'ensemble de l'étage 60KV.....	20
Figure II.5 : Transformateur de puissance	21
Figure II.6 : Transformateur de courant.....	21
Figure II.7 : Transformateur de tension	22
Figure II.8 : Disjoncteur haute tension	22
Figure II.9 : Sectionneur haut tension	23
Figure II.10 : Parafoudre.....	26
Figure II.11 : Schéma de fonctionnement de la SST	26
Figure II.12 : Schéma de distribution en T.....	27
Figure II.13 : Schéma de Distribution en TT	27
Figure II.14 : alimentation sans interruption.....	29
Figure II.15 : Alimentation par sol.....	30
Figure II.16 : Poste de contrôle centralisée PCC.....	33
Figure II.17 : Interférence électrique générée par un chemin de fer à CC sur une structure Métallique	34
Figure II.18 : la foudre s'abat sur le tramway de Bordeaux	35
Figure II.19 : Répartition du courant de foudre dans le cas d'un système de connexion ouvert en groupe à des rails.....	36
Figure II.20 : Graphe de taux d'augmentation du courant (di/dt).....	37
Figure II.21 : défaut à la terre dans la sous-station – résultats	38
Figure II.22 : Défaut à la terre le long de la ligne à proximité de la sous-station.....	38
Figure II.23 : Protection contre les chocs électriques.....	40
Figure II.24 : Synoptique des opérations de maintenance	43

CHAPITRE III

Figure III.1 : protection de phase	46
Figure III.2 : protection de tension.....	46
Figure III.3 : Schéma du système de protection DC.....	47
Figure III.4 : Surveillance de l'isolement dans un circuit principal AC/DC.....	48
Figure III.5 : Schéma de fonctionnement de la solution de BENDER dans le système du Tramway.....	49
Figure III.6 : Contrôleur permanent d'isolement.....	50
Figure III.7 : Bender ISOSCAN EDS440.....	50
Figure III.8 : Réflectométrie dans le domaine temporel à spectre étalé.....	52

Figure III.10 : exemple sur un défaut dans un câble sur 311.34 mètre.....	52
Figure III.11 : Deux signaux avec progression de la défaillance de l'état sain à l'état proche de la défaillance	54
Figure III.12 : Détection de pic de variance fenêtrée.....	56
Figure III.13 : Évaluation du signal dans le domaine fréquentiel à l'aide de méthodes statistiques.....	56

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : schéma global de tramway	58
Figure IV.2: mesure de la Tension U	59
Figure IV.3 : mesure du Courant I.....	59
Figure IV.4 : mesure de la Puissance active P et réactive Q.....	60
Figure IV.5 : mesure de la vitesse V.	60
Figure IV.6 : schéma global de tramway par le défaut électrique.....	61
Figure IV.7 : schéma de tension V cas de défaut.....	61
Figure IV.8: schéma de courant I cas de défaut.....	62
Figure IV.9 : V amont et V aval	62
Figure IV.10 : court-circuit	63
Figure IV.11 : schéma de Puissance cas de défaut.....	63
Figure IV.12 : schéma de la puissance réactive Q.....	64
Figure IV.13 : variation de couple.....	64
Figure IV.14 : Matrice de confusion simulink	70
Figure IV.15 : classification SCATTER simulink.....	70
Figure IV.16 : ROC courbe simulink	71
Figure IV.17 : cas réel de défaut pris par SETRAM	71
Figure IV.18 : SCATTER (données de SETRAM).....	72
Figure IV.19 : Matrice de confusion (données de SETRAM).....	73
Figure IV.20 : ROC courbe réel.....	73

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients du tramway	7
---	---

CHAPITRE II

Tableau II.2 : Les types de distribution de sous-stations.....	26
Tableau II.3 : Caractéristiques géométriques de la LAC.....	31
Tableau II.4 : Principales caractéristiques du fil de contact	31

CHAPITRE IV

Tableau IV.5 : Apprentissage en classification (Classification Learner).....	68
Tableau IV.6 : Matrice de confusion	69
Tableau IV.7 : Apprentissage en classification (Classification Learner).....	72

LISTE D'ABREVIATION

A: Ampère

V : Volt

Hz : Hertz

Icc: Courant de court-circuit

In : Courant nominal

IP : Indice De Protection

CA : Courant Alternatif

CC : Courant Continu

ACC-ARU : Armoire Contrôle Commande – Arrêt d'Urgence

ASI : Alimentation sans interruption (énergie AC ou DC)

BT : Basse Tension

CEI: Commission Electrotechnique Internationale

CEM : Compatibilité Electro Magnétique

DA : Cellule disjoncteur 30 kV d'arrivée SST

DD : Cellule disjoncteur 30 kV de départ SST

DHTA-R : Départ du tableau 30 kV vers le transformateur de traction

DTRS : Détecteur de Tension Rail

DTRA: Cellule Départ Transformateur de Services Auxiliaires

DUR : Disjoncteur ultra-rapide

FP : Parafoudre

JDB : Jeux de barre

MALT : Mise à la terre

NEG: Armoire de négatifs

IST : Interrupteur de secours télécommandé

LAC : Ligne aérienne de contact

PCC : Poste de Conduite Centralisé

PEF : Poste Eclairage Forcé

PHT : Poste haute tension

PNA : point neutre artificiel

SST : Sous-Station de Traction

SSR : Sous-Station de Répartition

SIA : Sectionneur d'Isolement Automatique

TBTCC : Tableau Basse Tension Courant Continue (127 Vcc)

TBTS : Tableau Basse Tension Secourue (230Vca)

TDT : Tableau de distribution traction

TGBT : Tableau Général Basse Tension

TC : Transformateur de Courant

TT : Transformateur de Tension

TPT : Tableau de protection traction

TRT : Transformateur de traction

TRA : Transformateur auxiliaire

SSTDR: Spread-spectrumtime domain reflectometry(Réfectométrie dans le domaine temporel à spectre étalé)

SCADA: Supervisory control and data acquisition (Contrôle et d'acquisition de données)

S&C: Switches and crossings (Aiguillages et passages à niveau)

SVM: support vector machine (machine à vecteurs de support)

PCA: Principal component analysis of raw data (Analyse en composantes principales des données brutes)

ROC: receiver operating characteristic curve (courbe caractéristique de fonctionnement du récepteur)

FOLDS: Plis

SETRAM : Société d'Exploitation des Tramways

SONELGAZ : Société Nationale de l'Électricité et du Gaz

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le contexte actuel de développement urbain et de mobilité durable, les systèmes de transport en commun, tels que les tramways, jouent un rôle crucial. Assurer leur bon fonctionnement et leur fiabilité est une priorité pour garantir un service de qualité et éviter les interruptions coûteuses. Les défaillances électriques sont parmi les principales causes de dysfonctionnements dans les systèmes de tramways, ce qui souligne l'importance de leur détection précoce et précise.

Traditionnellement, la détection des défauts électriques repose sur des inspections manuelles et des méthodes de diagnostic basées sur des seuils prédéfinis. Cependant, ces approches peuvent manquer de sensibilité et de précision, conduisant à des diagnostics erronés ou tardifs. Avec l'avènement de l'intelligence artificielle (IA), de nouvelles opportunités se présentent pour améliorer la détection et le diagnostic des défauts électriques.

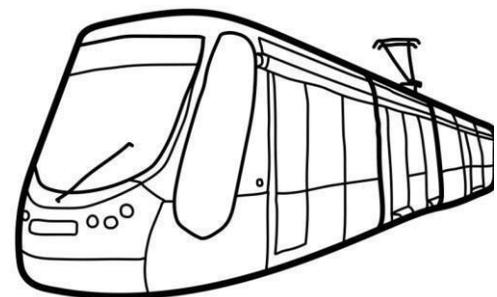
L'IA, en particulier les techniques d'apprentissage automatique, offre des capacités avancées pour analyser de grandes quantités de données, identifier des motifs complexes et prédire des anomalies avant qu'elles ne deviennent critiques. En appliquant ces techniques aux systèmes de tramways, il est possible de détecter plus efficacement les défauts électriques, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de maintenance.

Ce mémoire vise à explorer et à évaluer l'efficacité des techniques d'intelligence artificielle pour la détection des défauts électriques dans les tramways. Nous examinerons les méthodes actuelles utilisées par la société SETRAM et comparerons leur performance avec une approche basée sur l'IA. À travers des simulations et des analyses de données, nous chercherons à démontrer comment l'IA peut améliorer la fiabilité et l'efficacité des systèmes de tramways.

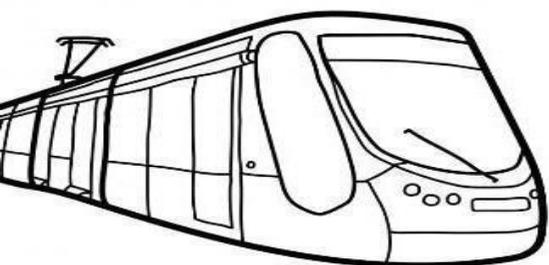
Dans ce cadre, nous aborderons les aspects suivants :

1. La revue des méthodes traditionnelles de détection des défauts électriques dans les tramways.
2. La présentation des techniques d'intelligence artificielle pertinentes pour ce domaine.
3. La conception et la mise en œuvre d'un modèle basé sur l'IA pour la détection des défauts.
4. L'analyse des résultats obtenus et la comparaison avec les méthodes traditionnelles.
5. Les implications pratiques et les perspectives d'amélioration future.

En conclusion, ce mémoire contribuera à démontrer le potentiel de l'intelligence artificielle pour transformer les pratiques de maintenance dans le secteur des transports publics, en particulier dans les réseaux de tramways, et à promouvoir une mobilité urbaine plus fiable et efficiente.



CHAPITRE I :
PRÉSENTATION DU TRAMWAY DE
MOSTAGANEM



1. Introduction :

La demande de transport urbain a beaucoup évolué depuis les années 1970 en se complexifiant et dans le même temps, le transport urbain est devenu une question éminemment politique et stratégique pour les agglomérations tant il est patent que les enjeux qui y sont associés sont structurants pour leur avenir.

Les services de transports publics officiels sont ceux disponibles au public, payants, qui suivent des parcours déterminés, avec des horaires et des tarifs fixés (et dans le cadre de ce document) dans des zones urbaines. Ils peuvent être exploités par des organismes publics ou privés et couvrir une large gamme de supports tels que bus, trains légers tramway, métro, trains, TGV...

Le transport est devenu une chose nécessaire dans la vie quotidienne en raison de ce qui répond aux besoins de l'être humain et des facilités dans son mouvement, car nous utilisons plusieurs types et moyens de transport, comme le tramway via les chemins de fer, qui offre un grand confort et bien-être aux voyageurs utilisant plusieurs appareils et systèmes avancés.[3] Dans ce chapitre, nous parlerons de l'un des moyens de transport urbain modernes et définirons ses détails avec un modèle réaliste :

1. Le Tramway :

Le tramway (ou tram) est une forme de transport en commun urbain ou interurbain circulant sur des voies ferrées équipées de rails plats (alors que ceux des trains sont légèrement inclinés vers l'intérieur de la voie) et qui est implantée en site propre ou encastrée à l'aide de rails à gorge dans la voirie routière. Aujourd'hui, il est généralement à traction électrique [4].

1.1 Principe de fonctionnement :

1. L'énergie électrique nécessaire à l'alimentation du tramway est fournie par le réseau de SONELGAZ au Poste Hautes Tension (PHT) où le courant est abaissé.
2. Le PHT alimente les différentes Sous-Stations Traction (SST) réparties le long de la ligne. Le courant de traction y est abaissé et redressé en 750 V continu.
3. Les SST alimentent directement la LAC de la ligne.
4. Les tramways captent le 750V sur la LAC grâce au pantographe, qui consomme par le moteur et d'autres équipements.
5. Le retour du courant de traction vers les SST se fait par le rail [5].

1.2 Historique du Tramway :

L'histoire fascinante du tramway remonte au 19^e siècle, époque où les premiers réseaux de tramways ont vu le jour en Europe et en Amérique du Nord. L'invention de rails sur lesquels circulaient des wagons tirés par des chevaux a révolutionné les déplacements urbains. À la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle, l'avènement de la traction électrique a considérablement modernisé les tramways, les rendant plus efficaces et économiques. Pendant des décennies, le tramway a été un pilier des systèmes de transport urbain, étendant ses lignes à travers les villes du monde entier. Cependant, avec l'essor de l'automobile au milieu du 20^e siècle, de nombreuses villes ont démantelé leurs réseaux de tramways au profit des véhicules privés. Le regain d'intérêt pour la durabilité et la mobilité urbaine au 21^e siècle a marqué le retour du tramway. De nombreuses villes ont réinvesti dans ces systèmes de transport, mettant en œuvre des technologies modernes pour assurer une cohabitation harmonieuse avec les autres modes de déplacement.



2022'

1920'

Figure I.1 : Tramway en 1920 et en 2022.

1.3 Les grands acteurs du monde ferroviaire :

Plusieurs typologies d'acteurs évoluent dans le secteur :

- 1) Les compagnies ferroviaires et opérateurs qui transportent des passagers ou du fret (tels que la RATP, la SNCF mais aussi les sociétés étrangères comme la Deutsche Bahn)
- 2) Les constructeurs et équipementiers qui, eux, développent et conçoivent le matériel roulant exploité par les opérateurs : [Alstom](#) Transport, Siemens, Bombardier, Hitachi...
- 3) Les acteurs qui œuvrent au niveau des infrastructures ferroviaires comme : Egis Rail, Colas Rail ou NGE, [Cosider](#) ...

1.4 Les avantages et les inconvénients du Tramway

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients du tramway

Avantage	Inconvénients
<p>Durabilité Environnementale : Le tramway, en utilisant généralement une alimentation électrique, réduit les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux modes de transport basés sur des combustibles fossiles</p>	<p>Coût Initial Élevé : La mise en place d'infrastructures de tramway nécessite des investissements initiaux importants, y compris la construction de voies et l'achat de matériel roulant</p>
<p>Capacité de Transport : Les tramways ont une capacité de transport élevée, permettant de déplacer un grand nombre de passagers à la fois, ce qui les rend efficaces pour répondre à la demande dans les zones densément peuplées.</p>	<p>Encombrement Visual : Les infrastructures du tramway peuvent être perçues comme visuellement intrusives, en particulier dans les zones historiques ou architecturalement sensibles.</p>
<p>Réduction des Embouteillages : en circulant sur des voies dédiées, le tramway contribue à réduire les embouteillages en offrant une alternative rapide et fiable</p>	<p>Dépendance à l'Infrastructure : les tramways dépendent d'infrastructures fixes, limitant leur flexibilité par rapport aux véhicules sur pneus</p>
<p>Intégration Urbaine : Les tramways peuvent être intégrés harmonieusement dans le tissu urbain, contribuant à revitaliser les zones environnantes et à favoriser le développement urbain</p>	<p>Vulnérabilité aux Accidents : En raison de leur tracé fixe, les tramways peuvent être plus vulnérables aux accidents avec d'autres véhicules ou aux obstacles sur les voies.</p>

2. Tramway de Mostaganem :

L'Entreprise du Métro d'Alger (EMA) avait attribué le contrat du projet du tramway de Mostaganem à Alstom et Cosider. Alstom s'est chargé de la fourniture du système intégral, des systèmes de télécommunication et de signalisation, des sous-stations, de la billettique, des équipements de dépôt ainsi que les rames de tramways CITADIS qui ont été fournies par sa Joint-Venture CITAL. De son côté le groupement Cosider (Travaux Publics/ Ouvrages d'Art) a réalisé le génie civil, le système voie ferrée, la caténaire et la signalisation lumineuse de trafic.

Le tramway de Mostaganem, également connue sous le surnom de "La ville du quatrième art", a été un ajout significatif au paysage urbain de cette ville méditerranéenne, réputée pour son riche patrimoine culturel et artistique.

Mis en service le 18 février 2023, le tramway de Mostaganem a répondu aux attentes des résidents qui attendaient avec impatience ce nouveau mode de transport. Il a apporté une contribution notable à l'amélioration de la mobilité des citoyens dans la ville.

La ligne de tramway se compose de deux branches, totalisant une longueur de 14,2 kilomètres au total. La branche principale s'étend sur 12 kilomètres, reliant Salamandre à la région de Kharouba, La branche secondaire, quant à elle, relie le centre-ville à la nouvelle gare routière sur une distance de 2 kilomètres.

Cette infrastructure de transport moderne offre aux habitants de Mostaganem une alternative efficace et durable pour leurs déplacements urbains, tout en contribuant à l'embellissement et au dynamisme de la ville



Figure I.2 : Tramway de Mostaganem.

2.1 La société d'exploitation du tramway SETRAM :

La Société d'Exploitation des Tramways d'Algérie (SETRAM) est une entreprise majeure en Algérie, chargée de l'exploitation et de la maintenance des tramways dans plusieurs villes du pays, dont Alger, Oran, Constantine, Sidi Bel Abbès, Ouargla et Sétif. Initialement formée grâce à un accord entre l'Entreprise du Métro d'Alger (EMA) et le groupe RATP, elle est devenue entièrement algérienne depuis mars 2023.

Désormais, la SETRAM est détenue à 85% par le groupe Transtev et à 15% par l'EMA. Elle joue un rôle crucial dans la fourniture de solutions de mobilité durable et efficace pour l'Algérie, en offrant des services de transport urbain et suburbain. La société contribue significativement à la connectivité et à la facilitation des Déplacements des habitants ainsi que des visiteurs dans les villes algériennes.

SETRAM gère 7 lignes de tramway à travers le territoire national, démontrant ainsi une vaste portée géographique et un engagement envers l'amélioration de la mobilité urbaine en Algérie.

De plus, avec plus de 10 ans d'expérience sur le terrain, la SETRAM bénéficie d'une expertise solide dans le domaine de l'exploitation des tramways. Elle emploie également plus de 4 000 travailleurs, soulignant ainsi son importance en tant qu'employeur majeur et contributeur économique dans le pays.

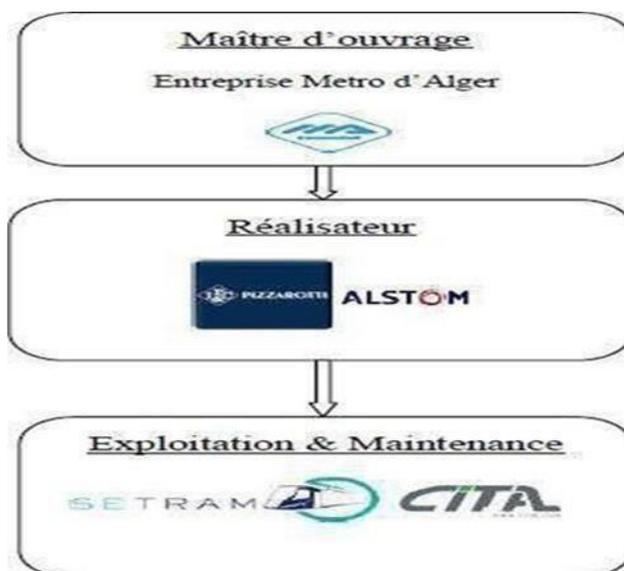


Figure I.3 : Organigramme de SETRAM.

2.2 Les objectifs de l'entreprise :

- Diriger le secteur des transports en Algérie vers un nouveau modèle de transport urbain accessible à tous
- Fournir un service de transport de haute qualité où la sécurité, le confort, la régularité et la propreté sont disponibles en tant qu'éléments essentiels du système de fonctionnement de l'entreprise
- Accompagner les Algériens au stade de la coexistence avec ce nouveau moyen de transport et le consolider dans les habitudes quotidiennes de leur voyage
- Considérer cela comme une référence en Afrique et dans le monde

2.3 Les différents Tramway d'Algérie en services (par couleur de ram) :

1. Tramway d'Alger : Mise en service le 8 mai 2011.
2. Tramway d'Oran : Mis en service le 2 mai 2013.
3. Tramway de Constantine : Mis en service le 4 juillet 2013.
4. Tramway de Sidi Bel Abbes : Mise en service le 26 juillet 2017.
5. Tramway de Ouargla : Mis en service le 20 mars 2018
6. Tramway de Sétif : Mis en service le 8 mai 2018.
7. Tramway de Mostaganem : Mis en service le 18 février 2023.



Figure I.4 : Les 7 Tramways d'Algérie en service.

3. La Maintenance du Tramway :

L'objectif principal est d'assurer la sécurité à la lumière de la disponibilité, de la crédibilité et de l'entretien du système de transport au fil du temps, en solidarité entre SETRAM et CITAL afin d'assurer la fourniture d'un service public aux passagers sur la base du principe du respect des normes AFNOR et des exigences de sécurité, de régularité et de qualité. En conséquence, les principales tâches sont les suivantes :

- ✓ Effectuer l'entretien (préventif et correctif) des systèmes (pistes, billets, cordon de communication, alimentation électrique, radio, téléphone, informations sur les passagers...) Et les travaux techniques consacrés aux wagons de tramway, ainsi qu'à une bonne hygiène des lieux.
- ✓ Activités de conduite et achat de pièces de rechange grâce au système GMAO (gestion de maintenance assistée par ordinateur).

✚ Pour voir les caractéristiques principales de la rame voir l'Annexe



Figure I.5 : La maintenance de SETRAM.



Figure I.6 : La maintenance de CITAL.

4. Description générale de réseau du Tramway :

4.1 Réseau de traction en ligne :

Les principales caractéristiques de la ligne du tramway de Mostaganem sont les suivantes :

- ⑩ Longueur de la ligne : 14.2 km (approximativement), majoritairement en voie double
- ⑩ Stations de voyageurs sur le premier tronçon : 20
- ⑩ Stations de voyageurs sur le deuxième tronçon : 4
- ⑩ Nombre de sous-station sur la ligne : 7
- ⑩ Nombre de sous-station au dépôt : 1
- ⑩ Dépôt : Un dépôt sur un terrain de 12 ha
- ⑩ Remisage secondaire : Un remisage secondaire sur un terrain de 2 ha
- ⑩ Pôles d'échange : 4
- ⑩ Parc Relais : 6
- ⑩ Energie de traction : LAC-750V CC
- ⑩ Matériel Roulant : 25 rames de 42-43 m. (mise en service)
- ⑩ Fréquence 1er Tronçon : 6 minutes
- ⑩ Fréquence 2ème Tronçon : 4 minutes

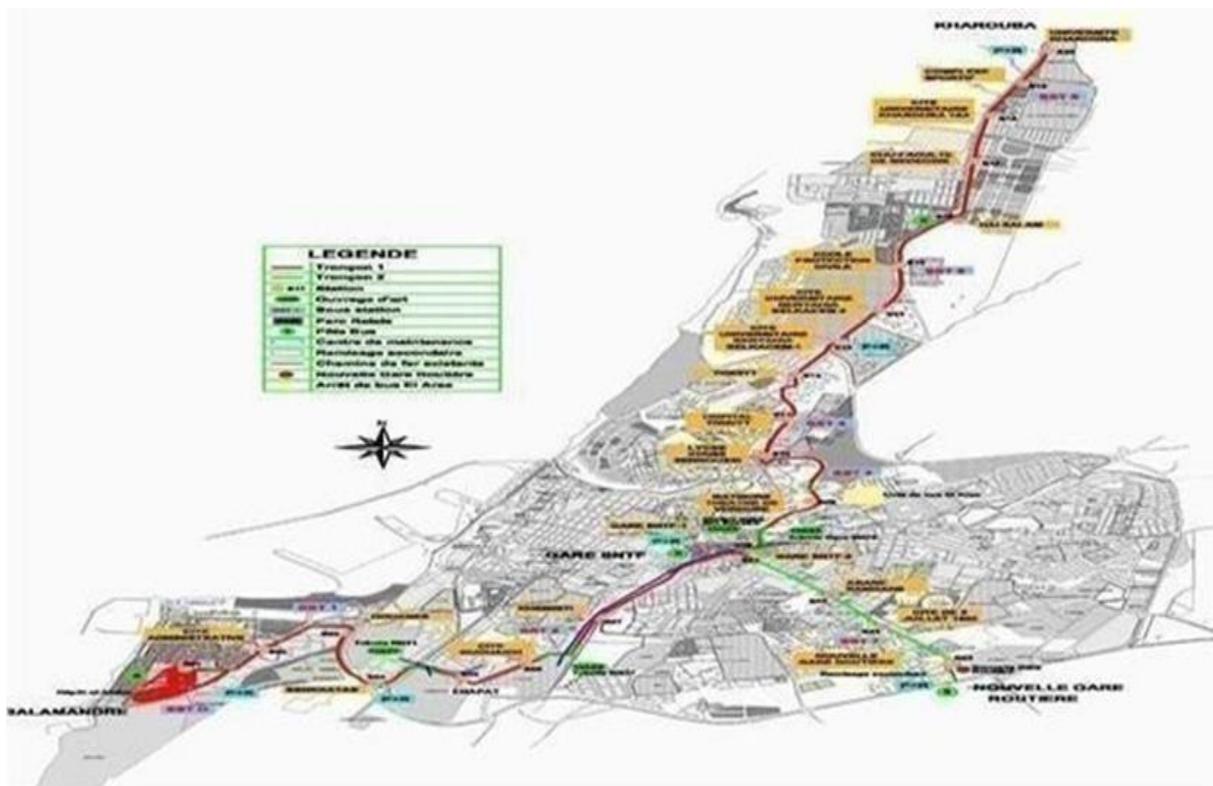


Figure I.7 : Schéma de réseau de traction du tramway de Mostaganem.

4.2 Réseau d'énergie :

Les installations de traction électrique sont constituées de l'ensemble des équipements permettant l'acheminement de l'énergie à la traction des véhicules par la distribution du courant aux rames du tramway. La transmission de cette énergie électrique passe par :

- ⑩ Un poste de transformation HT PHT afin d'abaisser le niveau de tension de 60 KVA 30 kV à une puissance de 2 x 10 MVA.
- ⑩ Un réseau de distribution HT (30 kV) propre tramway
- ⑩ Sous-stations de traction sont alimentées depuis PHT en 30kV à partir de la boucle30kV.
- ⑩ L'énergie de traction est délivrée au matériel roulant sous une tension de 750Vcc.Celle-ci est élaborée dans les sous-stations de traction (SST) par un ensemble groupe transformateur- redresseur.
- ⑩ Les deux principaux réseaux de distribution à partir des SST de la ligne de tramway sont :
 - ✓ Alimentation en 750 Vcc pour les rames de tramways
 - ✓ Alimentation en 400 / 230 Vca pour les équipements BT des SST, et pour stations voyageurs et autres locaux techniques en ligne ou au Dépôt.

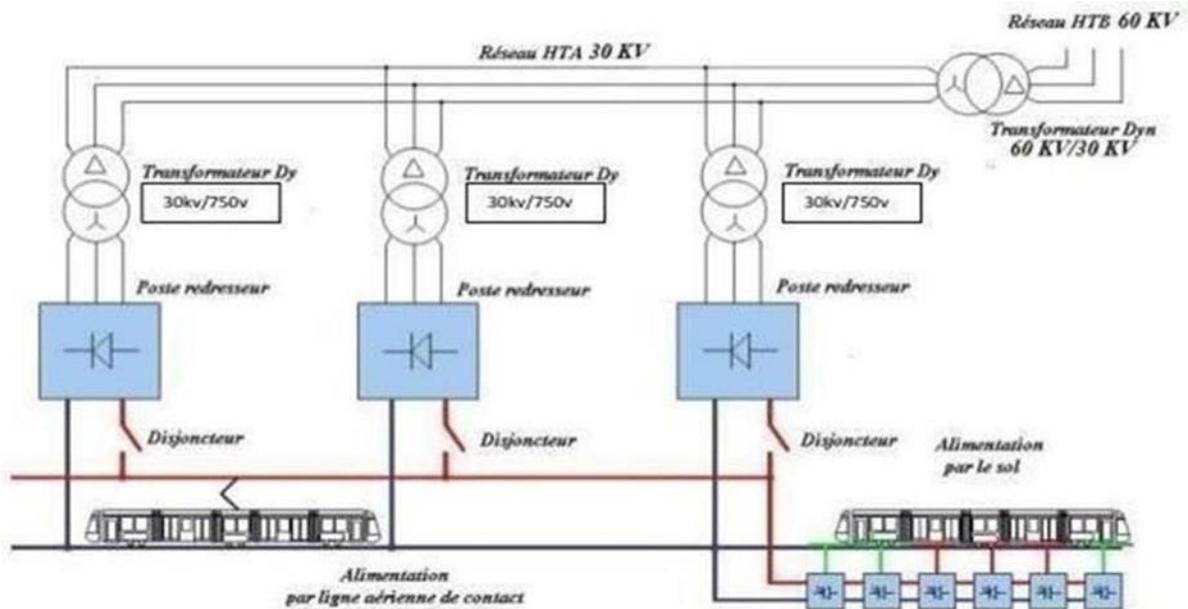


Figure I.8 : schéma de distribution d'énergie.

SETRAM vise à l'horizon 2026 un programme en 4 axes stratégiques et 10 chantiers opérationnels :

- 1) **Durabilité patrimoniale et financières** : Mettre en œuvre les plans de renouvellement dans le but d'assurer une bonne disponibilité des systèmes et améliorer la qualité de service.
- 2) **Développement commercial** : L'objectif étant d'augmenter le taux de couverture des charges liées aux frais de personnel à travers l'optimisation des effectifs et la diversification des ressources de financement.
- 3) **Adapter l'organisation** : Dans le cadre de la nouvelle démarche de management intégré : qualité, sécurité au travail & environnement, SETRAM s'engage à mener ses activités en préservant l'environnement et à fournir un milieu de travail sain et sécuritaire à ses employés.
- 4) **Digitalisation** :
- 5) Engager une démarche de transformation digitale responsable et inclusive à travers le développement d'outils performants, développés en interne, au service des opérations et des clients. Donc c'est quoi la digitalisation et son rôle dans notre projet ?

🚦 La digitalisation c'est un procédé qui vise à transformer un process, une profession, un objet ou encore un outil en code informatique afin d'améliorer les performances d'une organisation.

5. Conclusion :

Ce chapitre a mis en lumière les caractéristiques du tramway sur la ville de Mostaganem. À travers une analyse approfondie, nous avons constaté que le tramway constitue une solution de transport efficace, contribuant à réduire les embouteillages, à améliorer la qualité de l'air et à faciliter la mobilité des habitants, nous avons constaté durant notre stage que le tramway fait l'objet pendant son exploitation de plusieurs incidents techniques.

La maintenance actuelle fait face à ces situations de manière durable et inattendue. Grâce à la digitalisation et les méthodes d'intelligence artificielle, Nous travaillerons à améliorer le temps de détection du défaut et travaillerons à y remédier le plus rapidement possible afin d'élever le niveau de maintenance et de réduire les dommages humains et matériels à l'entreprise.

Dans le prochain chapitre, Nous donnerons une vue générale sur la forme du réseau électrique du tramway et ses défauts électriques attendues et sa maintenance.



CHAPITRE II :

LE RESEAU ELECTRIQUE DU TRAMWAY



1. Introduction :

Le réseau du Tramway peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une grande étendue et qui peuvent avoir un impact critique pour tous les systèmes électriques. Ces perturbations peuvent être, entre autres, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau transport ou de distribution.

Ce chapitre fournit une définition ; un aperçu de son évolution et des exemples de bonnes pratiques ; les principales caractéristiques de conception, de construction et de fonctionnement ; et les conditions préalables à sa sélection. De plus, il offre un aperçu général sur le réseau du tramway.

2. Généralités sur les réseaux électriques :

L'électricité est une énergie souple et adaptable mais elle est difficilement stockable, alors que la consommation des clients et la coïncidence de la demande sont constamment variables.

Le réseau électrique est un « système » très complexe. Il comprend des milliers des composants (générateurs, transformateurs, lignes, contrôleurs, systèmes de protection, entre autres).

La production de l'énergie électrique à proximité des lieux d'utilisation n'est pas toujours possible. Généralement, cette énergie est produite par des groupes de production sous une moyenne tension (15,5 kV ; 12,5 kV ; 11 kV ; 5,5 kV) dans des lieux de plus au moins distants des centres de consommation. Elle est ensuite transformée sous une haute tension (90kV ; 150kV ; 225kV...) par des transformateurs élévateurs installés à la sortie des générateurs.

La totalité de l'énergie produite ou le sur plus disponible est transporté par un ensemble de lignes électriques sous une haute tension sur plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres, jusqu'aux centres de consommation ; Elle est de nouveau transformée par des transformatrices abaisseur et distribuée sous une moyenne tension (30kV ; 10 kV...) pour la mettre à la disposition des usagers.

2.1 Fournisseur d'énergie :

Société Nationale de l'Électricité et du Gaz (**SONELGAZ**) exerce ses activités dans les secteurs déréglementés de la production d'électricité, de la fourniture de gaz naturel et d'électricité, récemment la société dispose des installations qui ont une puissance installée totale de 25 180 MW. Elle gère différents types de centrale de production électrique comme des centrales hydroélectrique, thermiques classiques, à cycle combiné, à cycle ouvert et dernièrement des centrales à base des énergies renouvelables. La production électrique en Algérie totalise un chiffre près de 72 395 GWh dans les dernières statistiques.

A la fin du 2023, la longueur du réseau de transport électrique réalisée par **SONELGAZ** est augmentée à **33 775 km**, et la longueur du réseau de distribution touche les **383 014 km** avec un nombre de client d'électricité plus de **11 461 721 clients**. Taux d'électrification : 99 %

On annonce aussi que la longueur du réseau de transport du GAZ est de **24 193 km**, et le réseau de transport de ce dernier est de **150 337 km** sachant que le nombre de client du gaz naturel touche les **7 308 462 clients**. Avec Taux de pénétration du Gaz Naturel : 65% [6]



Figure II.1 : Poste de transformation de SONELGAZ à Mostaganem.

2.2 Les caractéristiques d'un réseau électrique :

Un réseau électrique est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'un niveau tension à l'autre grâce aux transformateurs. [7]

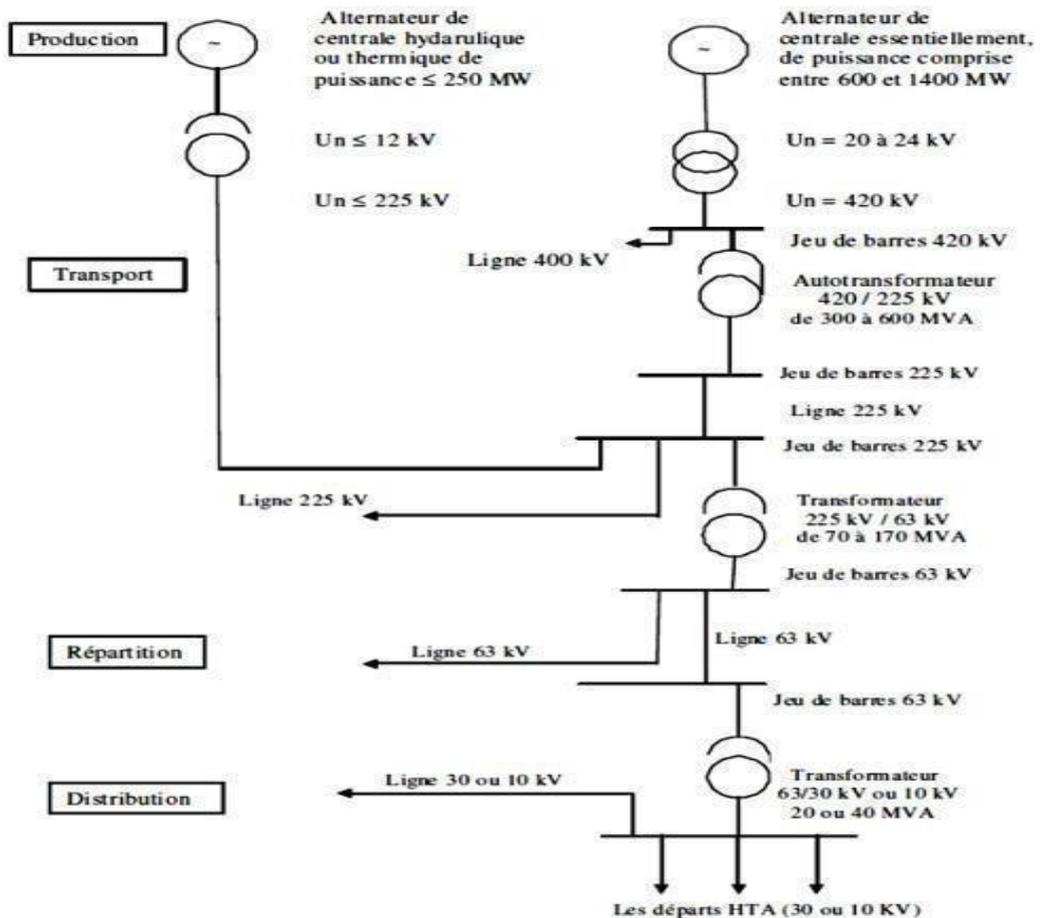


Figure II.2 : Schéma unifilaire d'un réseau électrique.

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions.

- **Les réseaux de transport** à très haute tension (**HTB**) transportent l'énergie des gros centres de production vers les régions consommatrices (de 220kV à 400kV). Ces réseaux sont souvent interconnectés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production.
- **Les réseaux de répartition** à haute tension (**HTA**) assurent, à l'échelle régionale, la desserte des points de livraison à la distribution.

- **Les réseaux de distribution** sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle, à l'exception de quelques gros clients Industriels alimentés directement par les réseaux **HTB** (30 kV-60 kV- 90 kV- 220 kV). On distingue deux sous- niveaux : les réseaux **HTA** (5.5kV- 10kV) et les réseaux à basse tension (400V).

3. Les infrastructures statiques du système de Tramway :

La fonction principale du système d'alimentation électrique de traction est de fournir l'énergie nécessaire aux tramways circulant sur la ligne à partir de :

1. D'un poste Haute Tension 60 KV /30 KV (PHT).
2. Dessous stations de traction (SST) ou sous stations de redressement (SSR).
3. Sous-système LAC.
4. Sous système SCADA (PCC). [8]

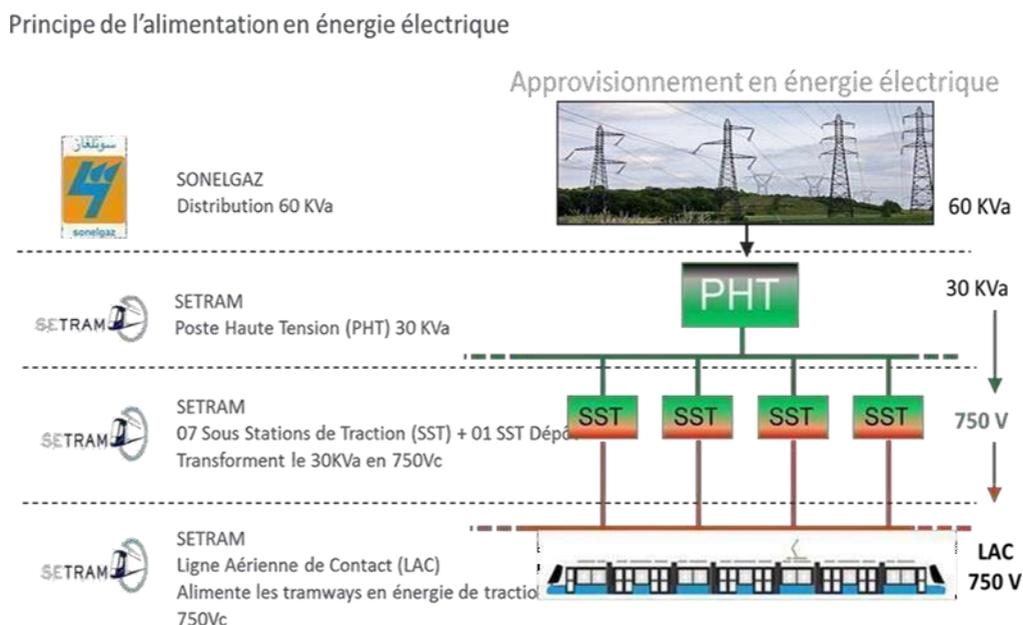


Figure II.9 : Réseau du Tramway.

4. Le réseau électrique du Tramway de Mostaganem :

4.1 Poste Haute Tension (PHT) :

L'objectif du PHT est de fournir, à partir d'une source d'alimentation de l'opérateur local SONELGAZ en 60 kV triphasés, une tension 30 kV triphasés à une puissance $2 \times 10 \text{ MVA}$.

La tension de sortie sera distribuée sur les sous-stations de traction électrique Implantées le long de la ligne, à travers la boucle 30kV principal et le boucles de renfort, puis à la ligne aérienne de contact en 750Vcc.

Au niveau de tension 60 kV, le PHT est composé du point de vue fonctionnel de :

- ✓ 2 arrivées 60 kV.
- ✓ 1 double jeu de barres (JdB 1 et JdB 2) avec couplage.
- ✓ 2 départs transformateur 60 kV / 30 kV.

Le PHT est alimenté par deux arrivées 60kV de poste Sonelgaz différents lesquels :

1. Une ligne depuis le poste source Sonelgaz «Sabelette ».
2. La deuxième ligne depuis le poste source Sonelgaz «Mostaganem Ville ».

Sur chacune des deux travées d'arrivée SONELGAZ 60kV triphasé 50Hz on trouve :

- ✚ Trois parafoudres : PF1-1/2/3 / PF2-1/2/3
- ✚ Trois transformateurs de tension : TT1-1/2/3 / TT2-1/2/3
- ✚ Un sectionneur : d'entrée ligne et terre, manuel, avec mise à la terre (côté ligne)
: QS1-1/1T / QS2-1/1T
- ✚ Trois transformateurs de courant : TC1-1/2/3 / TC2- 1/2/3
- ✚ Un disjoncteur triphasé : QD1-1 / QD2-1
- ✚ Deux sectionneurs triphasés motorisés : QS3-1 et QS3-2 / QS4-1 et QS4-2
- ✚ Un transformateur de puissance 60/30 kV : TR1 / TR2. Avec régleur en charge

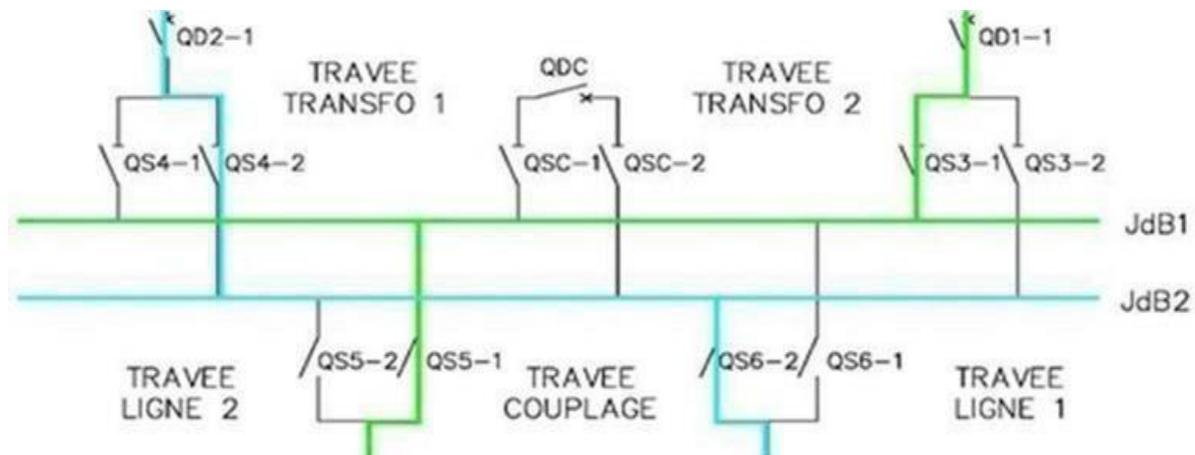


Figure II.10 : Vue d'ensemble de l'étage 60KV.

4.1.1 Les éléments constituant le poste HT :

A. Transformateurs :

Les transformateurs utilisés dans les postes électriques sont de trois types :

1) Les transformateurs de puissance :

Le transformateur de puissance est certainement le dispositif qui a permis l'essor puis la domination des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. La première fonction d'un transformateur a été l'élévation de la tension de transport afin de réduire le courant et donc les pertes joule générée dans les lignes. Cette élévation est bien entendue allée de pair avec l'abaissement de la tension aux points d'utilisation. D'un point de vue plus général, un transformateur est un élément indispensable à l'interconnexion des différents réseaux d'énergie.



Figure II.5 : Transformateur de puissance.

2) Transformateur de courant :

Les transformateurs de courant alimentent les instruments de mesure basse tension et les isolent du réseau. Ils délivrent à leur secondaire un courant normalisé proportionnel au courant primaire, ils doivent donc être adaptés aux caractéristiques du réseau en termes de tension, fréquence, courant. la précision de fonctionnement des appareils de mesure ou de protection dépend directement de la précision du transformateur du courant, sachant que: un TC de protection est conçu pour transmettre une image aussi fidèle que possible du courant de défaut (surcharge ou court-circuit), la précision et la puissance sont adaptées à ces courants et distinctes de celles pour la mesure.



Figure II.6 : Transformateur de courant.

3) Transformateur de tension :

Un transformateur de tension est un appareil utilisé pour mesurer de fortes tensions électriques. Il adapte la tension élevée d'un réseau électrique à des appareils de mesure ou de protection qui sont conçus pour mesurer des tensions plus faibles.



Figure II.7: Transformateur de tension.

B. Disjoncteurs à haut tension :

Un disjoncteur à haute tension est un équipement essentiel pour protéger les réseaux électriques. Il établit, supporte et interrompt les courants à sa tension assignée. Il fonctionne normalement pour connecter ou déconnecter une ligne, mais aussi pour éliminer les courts-circuit, causés par la foudre ou autres raisons. Cela évite d'endommager le matériel connecté. Les disjoncteurs utilisent un gaz ou un milieu isolant pour séparer les contacts.



Figure II.8 : Disjoncteur haute tension.

C. Sectionneur à haute tension :

La fonction principale d'un sectionneur haute tension est de pouvoir séparer (un disjoncteur isole mais ne sépare pas notions de distance) afin de permettre à un opérateur d'effectuer une opération de maintenance sur cet élément sans risque.

Le sectionneur doit :

- Indiquer sans ambiguïté sa position : on parle parfois de « coupure visible », quand les contacts ne sont pas directement visibles
- Pouvoir être cadenassé pour garantir à l'opérateur qu'un circuit isolé ne sera pas refermé par inadvertance.
- Posséder une isolation entre les bornes, qui garantisse à l'opérateur qu'une surtension ne puisse pas mettre en défaut cette isolation et remettre malencontreusement le circuit sous-tension.
- Ils doivent aussi pouvoir supporter des courants de court-circuit entre 25KA et 63KA.

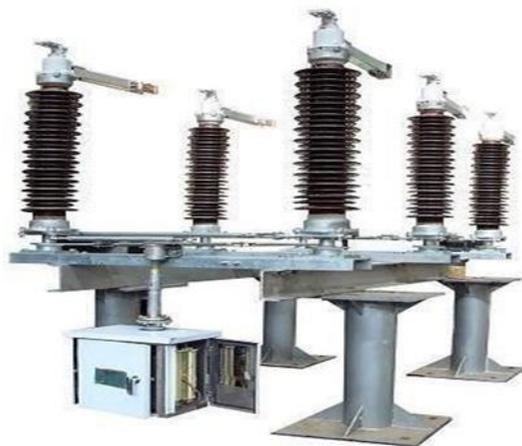


Figure II.9: Sectionneur haut tension.

D. Jeu de barre :

Les jeux de barre, généralement en cuivre ou en aluminium, relient les composantes d'un poste électrique et peuvent mesurer jusqu'à 120mm de diamètre. En cas de court-circuit, le poste entier peut être mis hors tension.

E. Parafoudre :

Selon le vocabulaire électrotechnique international, un parafoudre est un appareil destiné à protéger le matériel électrique contre les surtensions transitoires élevées et à limiter la durée et souvent l'amplitude du courant de suite. On emploie aussi le terme parasurtenseur.



Figure II.10 : Parafoudre.

4.2 Les sous stations de traction (SST) / (SSR) :

- ✓ Les sous-stations assurent la transformation de l'énergie alternative 30 kV en énergie continue 750 Vcc et distribuent l'énergie sur la ligne en respectant les contraintes de disponibilité et de sécurité.
- ✓ Les SST sont localisées le long de la ligne et l'alimentent en différentes sections électriques.
- ✓ Elles sont composées de deux fonctions principales : la production de l'énergie continue et la distribution de cette énergie vers la ligne aérienne de contact (LAC).

4.2.1 L'interface de la sous- station :

La sous-station est interfacée avec le Poste de conduite centralisé (PCC) et avec les autres sous-stations de la même section électrique. Le schéma fonctionnel est le suivant :

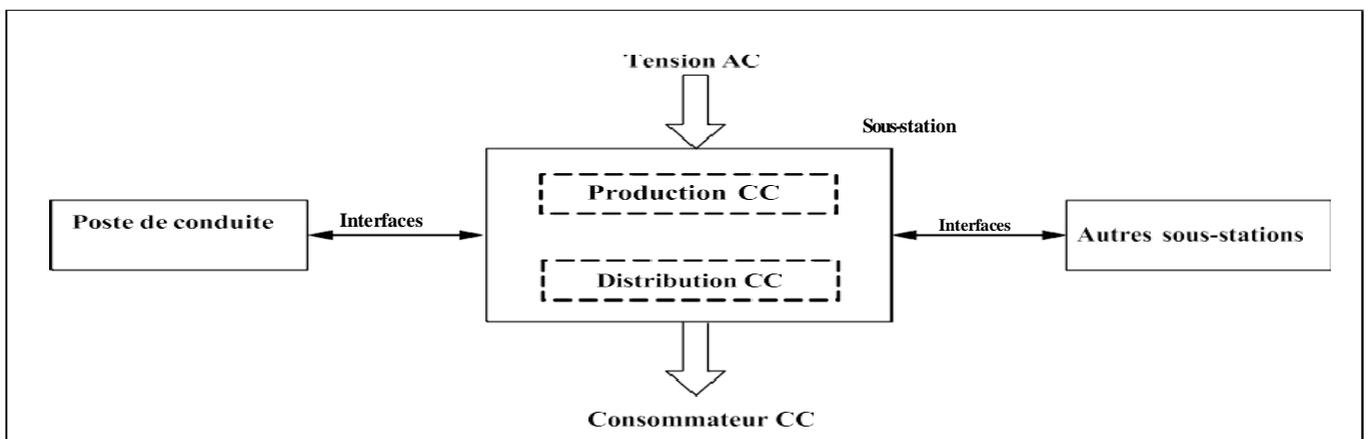


Figure II.11 : Schéma de fonctionnement de la SST.

La SST fournit deux types de tension :

- a) **Tension continue pour la traction** : Le transformateur de traction alimente en basse tension le redresseur qui à son tour fournit une tension continue de 750V. Passant à travers d'un sectionneur d'isolement automatique (SIA), d'un disjoncteur ultra rapide (DUR) et d'un sectionneur de ligne
 - b) **Tension alternative pour l'alimentation des auxiliaires** : Le transformateur auxiliaire Alimente le tableau général basse tension (TGBT) dans la Postes Eclairage Force (PEF) qui distribue la basse tension (BT) et assure la protection des équipements auxiliaires, de l'Armoire de Contrôle Commande (ACC), l'Armoire d'Arrêt d'Urgence AAU, et l'éclairage des quais de stations voyageurs et les plaques de signalisation les plus proches et pour l'alimentation des équipements de Postes Eclairage Force (PEF).
- La répartition des SSR le long de la ligne permet une stabilité de la tension, dans une marge acceptable évitant ainsi les problèmes dus aux chutes de tension qui vont crescendo avec la distance de la ligne. Dons une répartition adéquate permet de réduire ces chutes.

Pour ce qui concerne le schéma de distribution 750Vcc, les SST seront du type suivant :

Tableau II.2 : Les types de de distribution de sous-stations.

SST	Type
SST1	T
SST2	TT
SST3	TT
SST4	TT
SST5	TT
SST6	T
SST7	T
SST-D	T

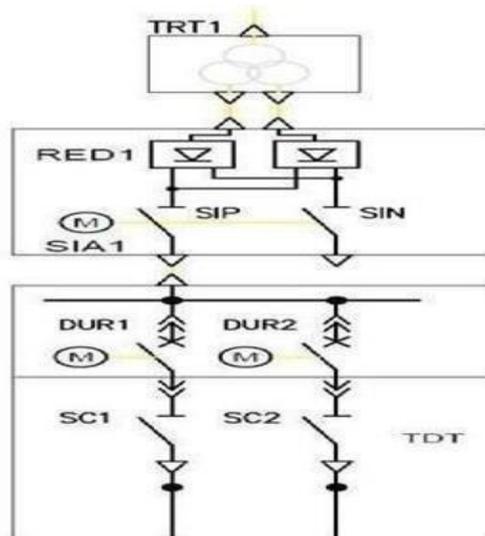


Figure II.12 : Schéma de distribution en T

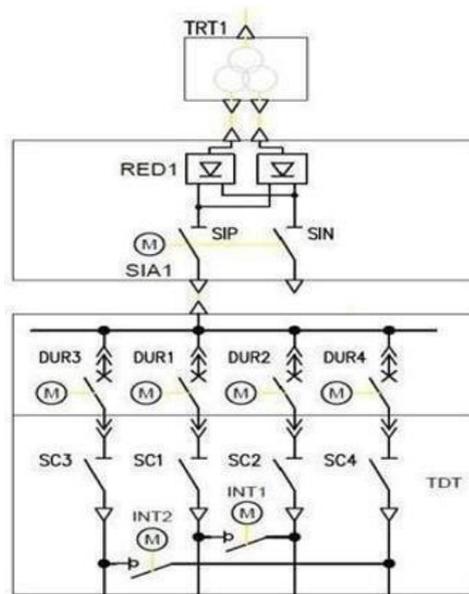


Figure II.13 : Schéma de Distribution en TT

4.2.2 Les équipements de la Sous-Station :

a. Transformateur de traction (TRT) :

D'après la norme NF C 52112-1 concernant les transformateurs triphasés de distribution de 50 kVa à 2 500 kVa destinés à fonctionner dans des réseaux de distribution triphasés, pour un service continu à l'intérieur comme à l'extérieur, conviennent aux installations de tramway.

Le transformateur de traction permet d'abaisser la tension alternative, HT, à une tension alternative BT qui alimente le groupe redresseur.

b. Transformateur de services auxiliaires :

Pour alimenter le service auxiliaire il s'agit un transformateur à l'huile d'un enroulement primaire couplé en triangle et d'un enroulement secondaire couplé en étoile avec le neutre à la terre.

c. Disjoncteur HTA de protection (DHTA-R) :

Les actionneurs de la cellule départ transformateur de traction des sous-stations en ligne DHTA- R sont manœuvrés avec les conditions suivantes :

- Charriot d'embrochage / débrochage
- Sectionneur de ligne
- Sectionneur de terre
- Disjoncteur
- Deux relais de protection : départ disjoncteur / température du transformateur

d. Redresseur (RED) :

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, transforme la tension (BT) alternative issue du (TRT), en énergie continue.

e. Sectionneur d'isolement automatique (SIA) :

Le sectionneur d'isolement automatique (SIA) permet d'isoler les polarités positives et négatives du redresseur. En fonctionnement normal le SIA est fermé et en mode automatique.

f. Disjoncteur ultra-rapide (DUR) :

Les DUR permettent de protéger et d'isoler la section électrique de LAC contre les défauts et les éventuelles surcharges. Dans chaque SST ils sont regroupés dans un tableau de protection traction (TPT). Sont opérables en mode local ou distance.

- Permettent la séparation des parties production et distribution par un tiroir débranchable.
- Sont sécurisés par cadenas afin de permettre une éventuelle action de maintenance sur la section électrique en toute sécurité
- Communiquent dans les SST adjacentes avec les DUR de la même section électrique.

g. Détecteur de tension rail sol (DTRS) :

Le détecteur de tension rail sol (DTRS) permet de protéger les personnes contre les tensions de rail dangereuses., un DTRS est installé dans chaque SST dans l'armoire retour négatif (NEG).

L'objectif de relais :

- ✓ Surveillance la tension rail – terre.
- ✓ Maintien cette tension en dessous de 50V
- ✓ Dans le cas où la tension rail-terre atteint la valeur de 50V le contacteur rail-terre associé au relais du DTRS connecte le circuit de retour traction (négatif) à la terre.
- ✓ L'alimentation a lieu au niveau de l'armoire NEG.

h. L'alimentation sans interruption (ASI) :

En cas de panne dans le réseau d'alimentation. Il faut assurer l'alimentation des capteurs et les services auxiliaires (l'éclairage. . .) et le système de commande des Appareils motorisé (disjoncteurs SIA ...), En temps normal, les batteries sont maintenues en charge, mais l'énergie est produite par le réseau via le redresseur et l'onduleur, dans le cas de panne l'énergie est produite par les batteries via l'onduleur.

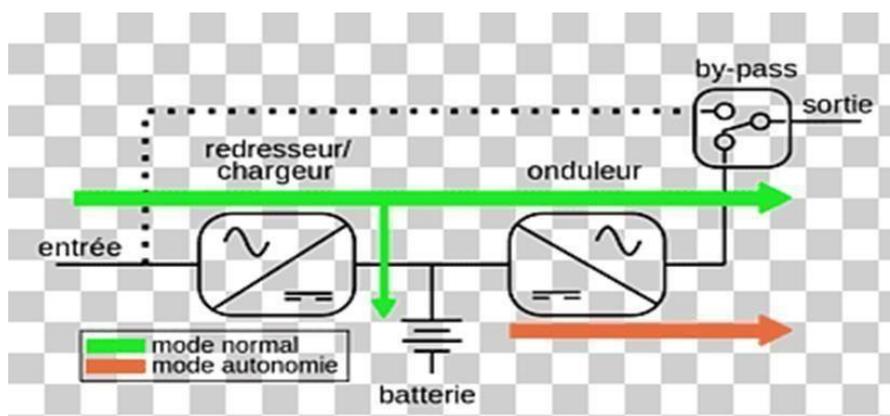


Figure II.14 : alimentation sans interruption.

i. Sectionneur de ligne (SL) :

Le sectionneur de ligne dans les sous-stations a comme objectif d'isoler l'alimentation injectée à la ligne d'exploitation par ces dernières, il est considéré comme un équipement primaire pour les procédures de consignations (coupure visible).

4.3 Les Sous-systèmes caténaire (APS-LAC) :

Le système caténaire est un ensemble de câbles permet de répartir le courant fourni par les sous stations et de l'acheminer jusqu'à la motrice Il y a deux catégories de sous-système caténaire sont :

4.3.1 Alimentations Par le Sol (APS) :

L'alimentation par le sol ou APS est une méthode d'alimentation électrique pour tramways développée par Inno rail, filiale d'Alstom.

Cette méthode consiste en l'implantation d'un troisième rail au milieu des deux autres et à l'utilisation de " frotteurs " conducteurs sous le tramway. Le rail d'alimentation est segmenté en tronçons qui sont alimentés uniquement lorsqu'ils sont entièrement recouverts par le tram, évitant ainsi tout risque d'électrocution pour les autres usagers (piétons, cycles, motocycles)

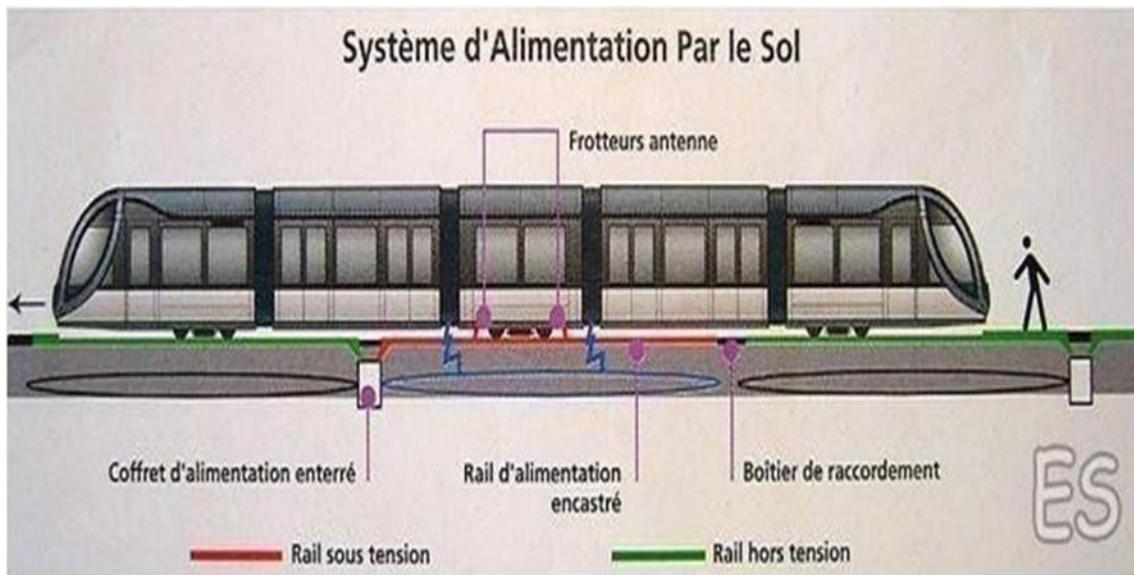


Figure II.15 : Alimentation par sol.

4.3.2 La ligne aérienne de contact (LAC) :

La ligne aérienne en voie (ligne principale) courante est constituée d'un fil décontract rainuré. Celui-ci peut être connecté à des points précis à un feeder constitué d'un ou plusieurs câbles souterrains placés dans une multitubulaire.

L'énergie électrique est distribuée par la ligne aérienne de contact depuis les sous-stations de Traction (SST). Chaque rame de tramway capte l'énergie distribuée (750Vcc) par la ligne aérienne de contact par l'intermédiaire de son pantographe.

- Dans cette partie, seule l'explication de la gestion des équipements sera précisée ainsi que les fonctions des équipements principaux

4.3.3 Les caractéristiques de la LAC :

a. La géométrie de la LAC :

Tableau II.3 : Caractéristiques géométrique de la LAC.

CARACTERISTIQUE	VALEURS
Hauteur normale du fil de contact	6,0 m
Hauteur minimum du fil de contact	6,0m (sur les routes)
Hauteur minimum du fil de contact	3,5 m (dans les trémies)
Hauteur maximale du fil de contact	6,5 m
Désaxement de laligne droite	+ / -300 mm
Désaxement maximum	+ / -350 mm

b. Fil de contact :

Les fils de contact, constituant le plan de contact, assurent l'alimentation électrique du matériel Roulant. Les caractéristiques du fil de contact sont :

- ✓ Excellente résistance mécanique et élasticité, Excellente conductivité.
- ✓ Masse linéaire réduite.

Tableau II.4 : Principales caractéristiques du fil de contact.

CARACTERISTIQUE	VALEURS
Tension mécanique	1500 daN (LAC régularisée) 1000daN (LAC non régularisée)
Tension d'alimentation de la ligne	750 Vcc
Section	150 mm ²
Résistance minimum à la traction	360 N/mm ²
Charge minimum de rupture	52,4 kN
Poids linéaire	1,34 kg/m
Diamètre	14,5 mm

c. Suspension des fils de contacts :

Afin d'obtenir une bonne souplesse de la ligne aérienne de contact, les fils de contact sont liés aux divers armements par l'intermédiaire d'une suspension en câble synthétique dit « Delta ». C'est une pièce porteuse assurant la tenue verticale du fil de contact. Ces suspensions sont réalisées au moyen d'un élément de câble synthétique isolant muni à ses extrémités d'une pince d'ancrage.

d. Isolateur de section (IS) :

Dont le rôle est de permettre d'isoler électriquement une section de caténaire, des sections encadrantes. En effet, pour des raisons d'entretien, il peut être nécessaire de ne plus alimenter une portion de caténaire. Il est utilisé soit sur les voies parcourues à faible vitesse.

Les isolateurs de sections assurent le découpage électrique des lignes aériennes de contact :

- En sections électriques, délimitées par la position des sous-stations de traction.
- En sous-sections électriques, délimitées par la position des sous sectionnements en Ligne, associés aux communications, En secteurs électriques sur le site du dépôt.

e. Indicateur de présence de tension :

Les voyants équipant les feux de présence tension sont une technologie de type diodes Électroluminescentes avec masque faisant apparaître un indicateur par Croix.

Ces indicateurs sont implantés sur les deux voies au-dessus de la plateforme. Ils présentent les indications suivantes :

- Le feu est allumé : présence 750Vcc
- Le feu est clignotant : absence de 750Vcc ou tension insuffisante
- L'indicateur éteint correspond à une panne du système

4.4 Sous-système SCADA (Poste de Contrôle Centralisé) :

SCADA (système de contrôle et d'acquisition de données) est une architecture de système de contrôle sophistiquée qui utilise des ordinateurs, des communications de données en réseau et des interfaces utilisateur graphiques pour la gestion de la supervision des processus de haut niveau. Il permet aux industries de surveiller, collecter et traiter des données en temps réel, permettant ainsi le contrôle des processus industriels localement ou à distance.



Figure II.16 : Poste de contrôle centralisée PCC.

5. Les défauts électriques dans les systèmes de tramway :

Dans les systèmes de tramway, de nombreux états de panne différents peuvent survenir pendant l'exploitation. Pour des raisons de sécurité, ces états de panne ou défauts bien connus doivent être évités par la surveillance des trains. Mais les états de défaut peuvent également avoir des dépendances entre eux, qui ne sont pas encore suffisamment connues ni utilisées pour la prévention des états de panne

5.1 Les caractères des défauts :

A. Défaut fugitif :

✚ Ce défaut nécessite une coupure très brève du réseau d'alimentation de l'ordre de quelques dixièmes de seconde.

B. Défaut permanent :

✚ Ce défaut provoque un déclenchement définitif de l'élément de protection. Il nécessite l'intervention du personnel d'exploitation.

C. Défaut auto- extincteur :

✚ C'est le défaut qui disparait spontanément en des temps très courts après qu'il provoque le fonctionnement de la protection.

D. Défauts semi- permanent :

✚ Ce défaut exige une ou plusieurs coupures relativement longues de l'ordre de quelques dizaines de secondes. Il ne nécessite plus l'intervention du personnel d'exploitation.

5.2 Les différents défauts du Tramway :

5.2.1 Le courant de fuite :

Définition : Les systèmes de traction à courant continu peuvent provoquer des courants de fuite susceptibles de nuire à la fois au chemin de fer concerné et/ou à des intérêts extérieurs [8]. La faible résistance entre les rails de retour de traction et le sol permet à une partie importante du courant de retour de s'infiltrer dans le sol. Cela est généralement appelé courant de fuite ou courant vagabond. La quantité de courant de fuite dépend de la conductance du retour des voies par rapport au sol et de la qualité de l'isolation entre les voies et le sol. Les courants de fuite posent des problèmes sérieux pour tout système de tramway.

Effets :

- Corrosion et dommages ultérieurs de la structure métallique là où les courants de fuite quittent les structures métalliques.
- Le risque de surchauffe, d'arc électrique et d'incendie et le danger ultérieur pour les équipements et les personnes ne se trouvant pas nécessairement dans la zone de responsabilité de l'autorité ferroviaire.
- Influenceur les systèmes de signalisation et de communication non immunisés.
- Influence sur des installations de protection cathodique non liées.
- Influence Sur Le Courant Alternatif Non Lié. Et Systèmes D'alimentation en courant continu.

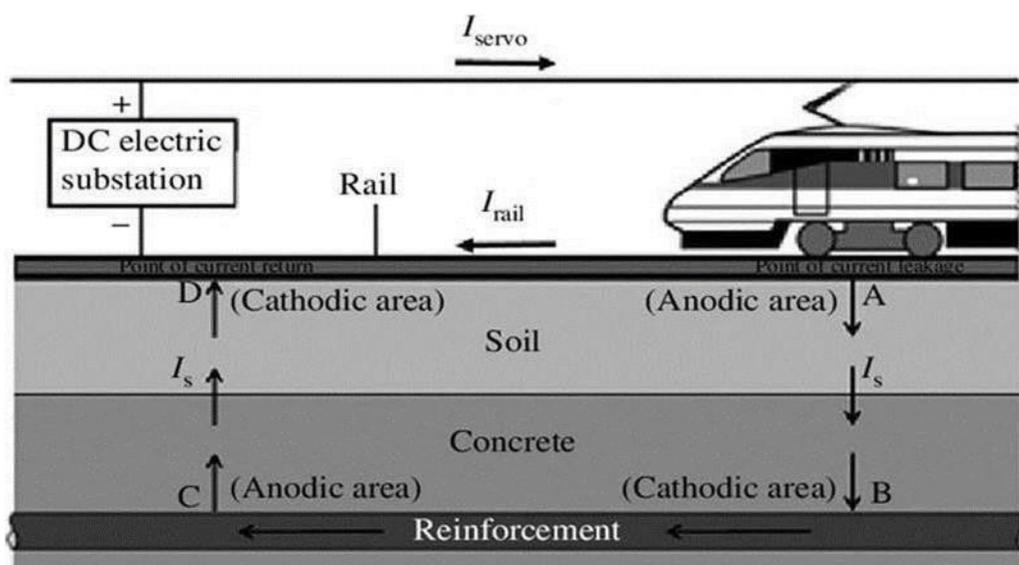


Figure II.17 : Interférence électrique générée par un chemin de fer à CC sur une structure Métallique. [9]

Les fuites de courant vagabond peuvent causer des dommages par corrosion aux rails et à tout autre environnement éléments métalliques. Il existe donc une exigence de contrôle des courants vagabonds afin de minimiser les impacts du courant vagabond sur le système ferroviaire, les infrastructures de support et les tiers Infrastructure. Il est donc recommandé de limiter le niveau de courants vagabonds à la source. Par des méthodes spécifiques de contrôle des courants vagabonds, plutôt que d'atténuer les effets sur le transport en commun et autres structures souterraines.

La réduction de la source de courant de fuite constitue la meilleure stratégie de protection contre la corrosion électrique. Réduire la source de courant de fuite dans les systèmes ferroviaires électrifiés. Cela peut être fait par :

- Réduire la résistance du rail de roulement
- Augmentation de la résistance d'isolement du rail et de la terre
- Augmenter le niveau de tension d'une sous-station
- Raccourcir la distance entre les sous-stations,

5.2.2 Les coups de foudre :

Le système d'alimentation aérienne de traction est exposé à la foudre directe. L'utilisation du fil de raccordement de groupe comme fil de protection contre la foudre naturelle contre la propagation de ce courant dans les systèmes de traction améliore radicalement la sécurité. Néanmoins des parafoudres sont nécessaires pour coordonner l'isolation.



Figure II.18 : la foudre s'abat sur le tramway de Bordeaux.

La protection contre les surtensions pour les systèmes DC est plus compliquée que pour les systèmes AC. Surtout dans le cas des systèmes à haute tension, où le problème principal est lié aux courants de suivi. Pour cette raison, l'utilisation de parafoudres, tels que les éclateurs à cornet, nécessitent l'utilisation de disjoncteurs à grande vitesse ou une construction spéciale de parafoudres pour assurer l'extinction du courant suivant.

La répartition des courants de pointe est nettement plus compliquée. La foudre avec la plus forte probabilité frappe une connexion de groupe fil qui agit comme conducteur de capture horizontal. Les chemins possibles du courant de foudre dans le système de connexion ouvert de groupe aux rails sont présentés dans la figure (26). Le courant de foudre est conduit vers le sol par des chemins de plus faible résistance par ce que le fil de liaison, qui intercepte la foudre, est directement mis à la terre à travers chaque mât de traction, le courant de surtension de foudre est distribué au sol en grande partie à travers construction de traction. La répartition du courant entre les mâts dépend de leur résistance de terre individuelle – chaque construction porteuse possède son propre système de mise à la terre, selon la réglementation en vigueur, la résistance de terre individuelle de chaque mât ne doit pas être supérieure à 50Ω . Une partie du courant de foudre peut être conduite vers des fils d'alimentation à travers des parafoudres, qui sont nécessaires à la coordination de l'isolation. Une partie de la surtension peut passer par la basse tension des dispositifs de limitation également, qui relie le fil de liaison aux rails. [10]

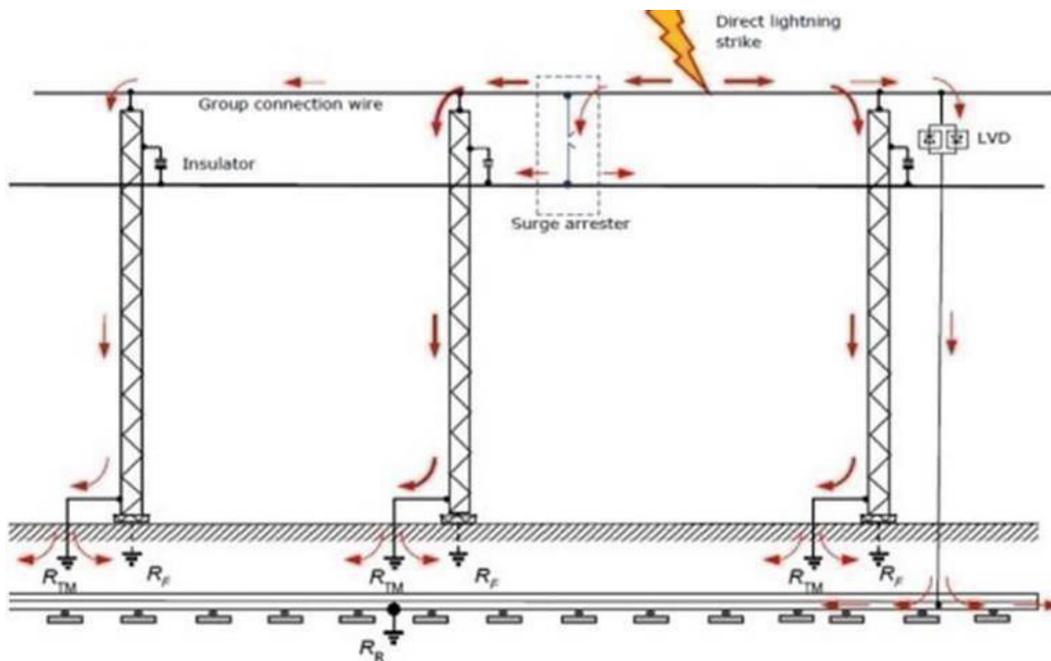


Figure II.19 : Répartition du courant de foudre dans le cas d'un système de connexion ouvert en groupe à des rails.

5.2.3 Les surintensités à taux de montée :

Étant donné qu’une sous-station de traction individuelle peut alimenter une voie ferrée sur plusieurs kilomètres, vous devez protéger l’ensemble du segment de voie. Le courant de court-circuit à proximité et à distance de la sous-station de traction peut différer considérablement. De plus, un événement de panne distant peut se situer dans la même plage de courant que l’appel associé au démarrage d’un train à proximité.

Un déclenchement incorrect lors du démarrage d'un train peut arrêter le fonctionnement du système ferroviaire et le fait de ne pas interrompre une condition de panne distante peut causer des dommages importants aux composants du système ferroviaire.

Si vous utilisez une protection, des commandes et une logique spécialisées ANSI-150RR pour surveiller le taux d'augmentation actuel (di/dt), vous pouvez obtenir le meilleur des deux mondes pour vous protéger contre les conditions de panne à distance et vous permettre de fonctionner en continu pendant les conditions d'appel. Lorsqu'il est configuré correctement, le taux de montée du relais fera la distinction entre la montée en courant plus lente pour un démarrage de train et la vitesse de montée plus rapide pour une panne du système. Cela fonctionnera même si l'ampleur des courants entre les défauts proches et distants peut varier considérablement.

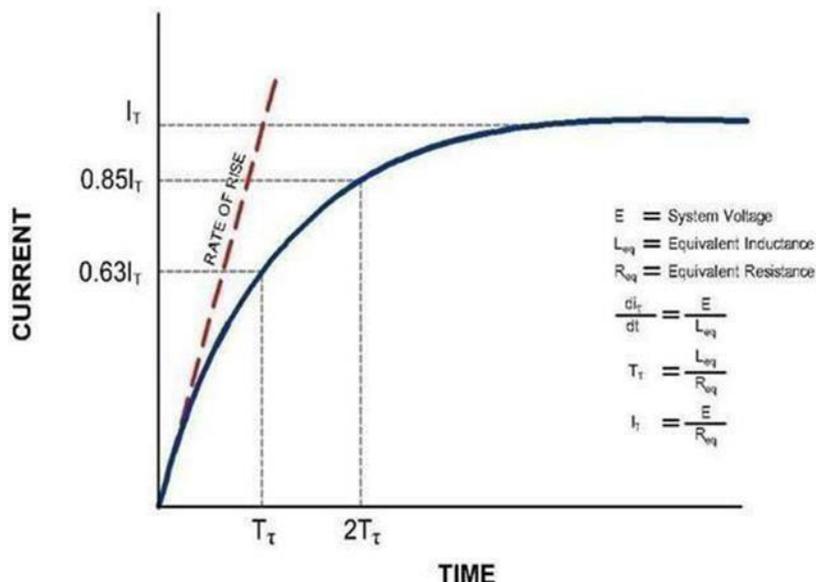


Figure II.20 : Graphe de taux d'augmentation du courant (di/dt). [8]

5.2.4 Défaut à la terre :

Le système de mise à la terre des sous-stations est constitué par une configuration typique d'une électrode annulaire avec quatre tiges. La résistance de terre typique peut varier dans la plage de 5 à 15 selon les caractéristiques du sol.

Le système de mise à la terre de chaque sous-station est connecté au les voisins grâce aux gaines des câbles MT et, à Turin, de conducteurs nus enfouis au contact du sol [11]

a) Défaut à la terre dans la sous-station :

Un défaut à la terre dans la sous-station peut se produire en raison d'un défaut du côté CC du convertisseur ou dans le tableau CC, impliquant les parties conductrices exposées (ECP) qui sont **connectées au système de mise à la terre de la sous-station.**

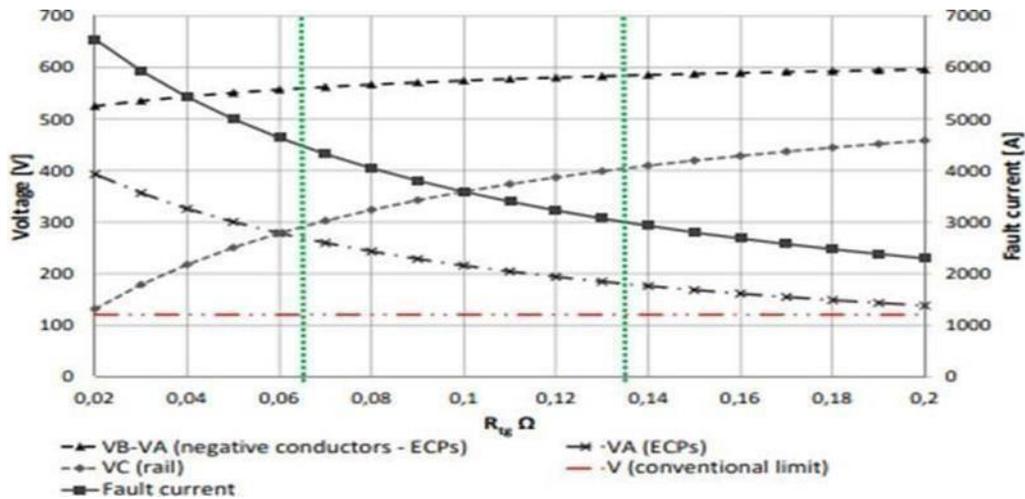


Figure II.21 : défaut à la terre dans la sous-station – résultats.

b) Défaut à un poteau (à la terre) le long de la ligne :

Le défaut sur un poteau du système de tramway est très peu probable, car tous les éléments utilisés pour maintenir l'OCS sont constitués de matériaux isolants (par exemple des cordes en para fil), mais si le défaut se produit, il s'agit d'un défaut à la terre car les poteaux.

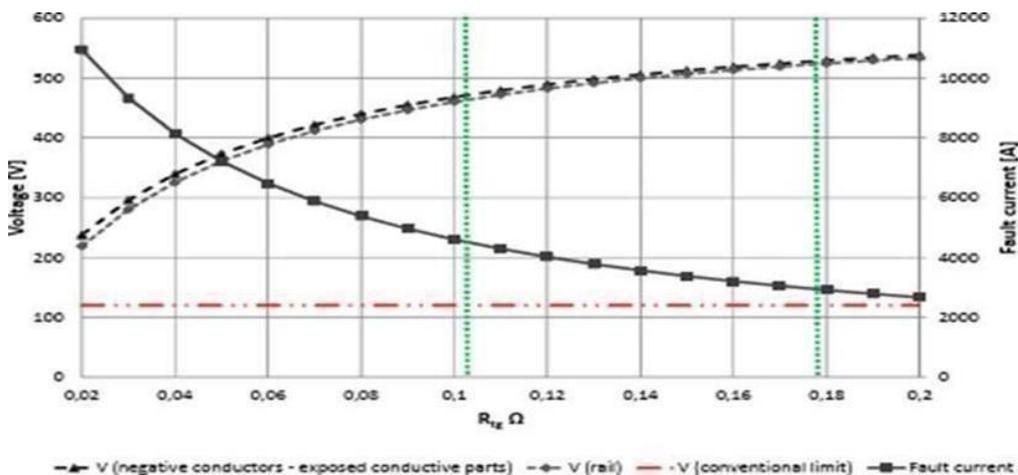


Figure II.22: Défaut à la terre le long de la ligne à proximité de la sous-station.

5.2.5 Le Court-circuit :

Lorsqu'un court-circuit se produit dans une sous-station, le courant est rapidement coupé par le disjoncteur. Cependant, si le court-circuit se produit à l'extérieur de la sous-station, le courant est limité par les résistances du circuit, ce qui peut entraîner des tensions dangereuses à long terme. C'est pourquoi de nouveaux relais plus sophistiqués sont nécessaires pour assurer une protection maximale. [12]

Pour protéger chaque segment, il est nécessaire de détecter instantanément le court-circuit afin d'éviter que l'énergie fournie à l'unique module de la ligne de contact ne dépasse l'énergie maximale que les modules sont capables de dissiper.

Les scénarios de pannes possibles pour le système considéré peuvent être résumés comme suit :

✓ Court-circuit sans impédance de défaut ou avec une impédance à laquelle correspond un courant de défaut (I_p) supérieur au courant nominal (I_n) du disjoncteur rapide situé dans le poste

✓ Court-circuit avec une impédance à laquelle correspond un courant de défaut compris dans la plage

✚ Qu'est-ce qui peut causer un court-circuit ?

De multiples causes peuvent provoquer un court-circuit, parmi les plus fréquentes, nous pouvons citer :

➤ Un défaut d'isolation : dans le cas de câbles dénudés qui ont été abîmés ou sectionnés par un meuble lourd, mâchouillés par un chien, etc...

➤ Un impact de foudre : sans paratonnerre ou parafoudre, une surcharge électrique peut survenir,

➤ Une surtension électrique : quand trop d'appareils sont branchés sur la même multiprise, par exemple,

➤ Un défaut de câblage : une erreur humaine peut tout à fait être à l'origine d'un court-circuit.

5.2.6 Le choc électrique :

Définition : Un choc électrique se produit lorsqu'une personne entre en contact direct avec un courant à haute tension qui traverse le corps.

La gravité d'un traumatisme électrique dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- ❖ Le type de courant (continu [CC] ou alternatif [CA]).
- ❖ La tension et l'ampérage (mesures de la force du courant).
- ❖ La durée de l'exposition (plus la durée est longue, plus les lésions sont sévères).
- ❖ La résistance du corps.
- ❖ Le cheminement du courant
- ❖ Le champ électrique est un concept plus récent qui semble prédire plus précisément la gravité des lésions.
- ❖ Les courants à haute tension (> 500 V) tendent à causer des brûlures¹.

Effet : Les accidents électriques à haute tension provoquent dans la plupart des cas la mort immédiate, car ce courant affecte les dommages aux organes humains et aux machines électriques, ce qui provoque un dysfonctionnement du réseau et perturbe le processus de production.

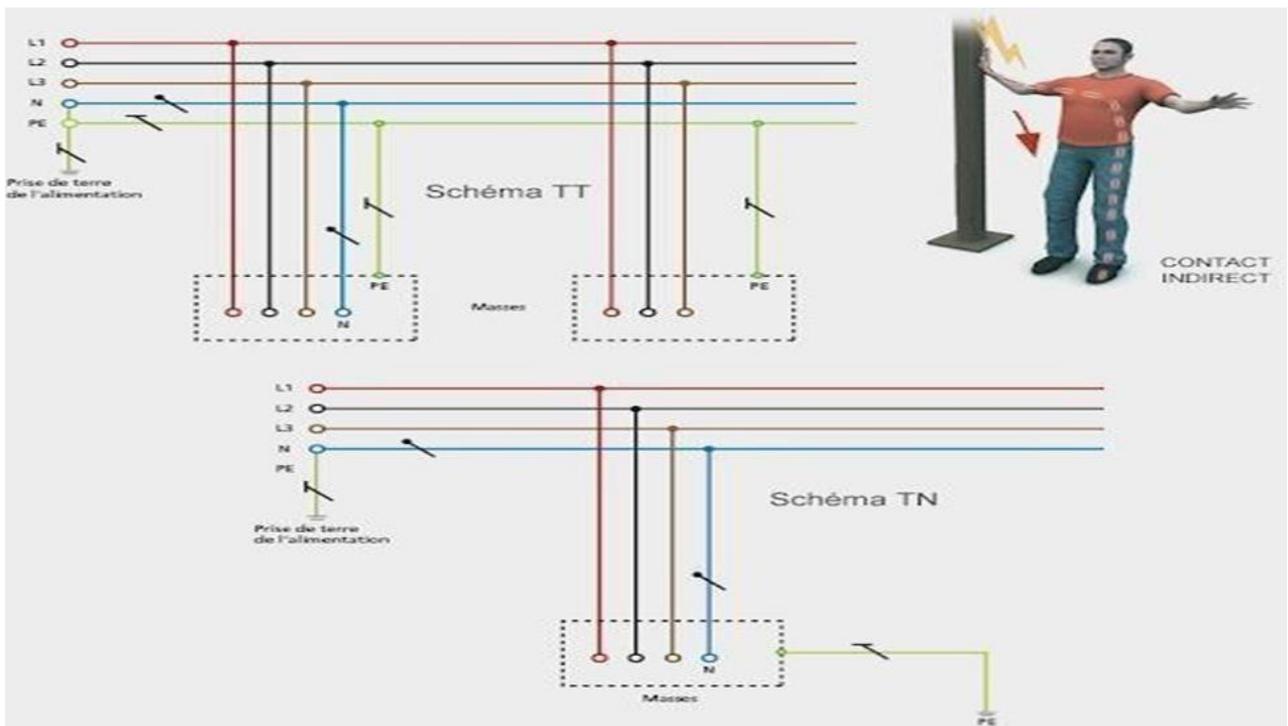


Figure II.23 : Protection contre les chocs électriques.

6. La maintenance du Tramway :

La maintenance des installations fixes a pour but d'assurer la sécurité pour les circulations, les personnes et pour l'environnement ainsi que la disponibilité des installations pour les besoins requis.

6.1 Les concepts :

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur 4 concepts :

- 1 **Les événements** qui sont à l'origine de l'action : référence à un échéancier, relation à un type d'événement (auto-diagnostique, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), l'apparition d'une défaillance.
- 2 **Les opérations de maintenance proprement dites** : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.
- 3 **Les activités connexes** : maintenance d'amélioration, rénovation, reconstruction, modernisation, travaux neufs, sécurité, etc.
- 4 **Les méthodes de maintenance** : qui leur seront respectivement associées :

A. La maintenance corrective :

La maintenance corrective appelée parfois curative a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation. Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraîne une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés et/ou une dépréciation en quantité et/ou qualité des services rendus.

B. La maintenance préventive :

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation. Elle peut être de trois types : (Maintenance systématique, Maintenance conditionnelle, Maintenance prévisionnelle ou prédictive)

Le but de la maintenance préventive est :

- ✓ Augmentera la durée de vie des matériels
- ✓ Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne
- ✓ Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective
- ✓ Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, de pièces détachées
- ✓ Diminuer le budget de maintenance

6.2 Les opérations de maintenance :

a) Les opérations de maintenance corrective :

1. Le dépannage : Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires (maintenance palliative) avec des conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation, basé sur le bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps.

2. La réparation : Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

b) Les opérations de maintenance préventive :

▪ Les inspections :

Activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

▪ Les visites :

Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

▪ Les contrôles :

Vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut :

- a. Comporter une activité d'information
- b. Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement
- c. Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective

▪ Les opérations de surveillance :

Sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

- ✚ La maintenance possède plusieurs niveaux suivant les priorités de protections ces niveaux détaillées dans l'Annex

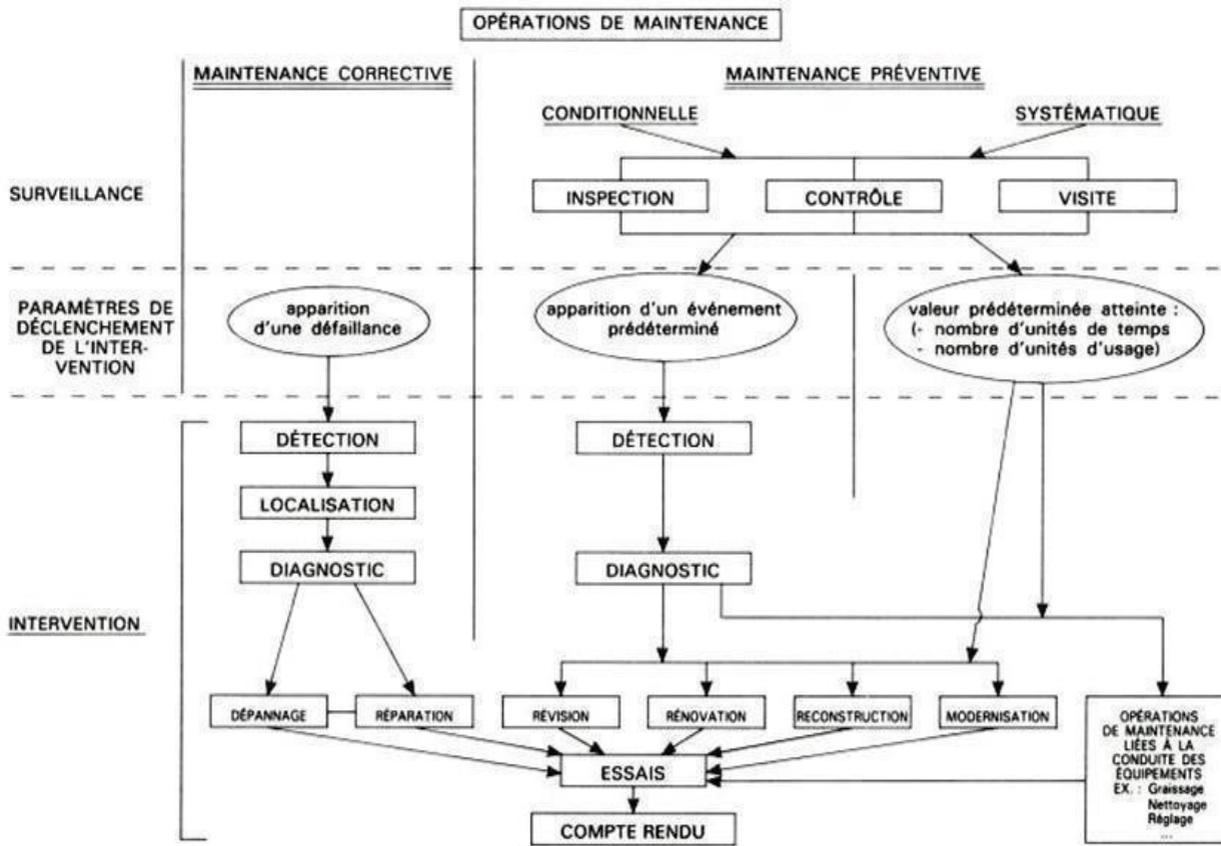


Figure II.24 : Synoptique des opérations de maintenance.

7. Conclusion :

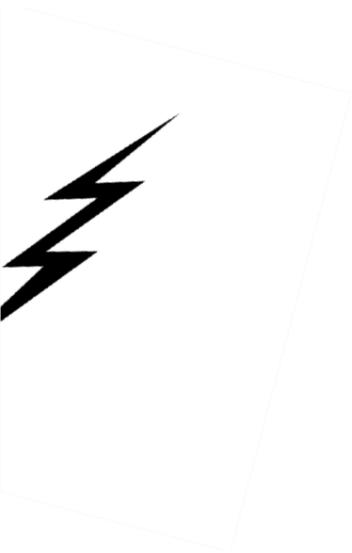
La gestion des défauts et la maintenance du tramway sont des aspects essentiels pour assurer son bon fonctionnement, sa sécurité et sa durabilité. Malgré les avantages du tramway en termes de mobilité durable et d'efficacité énergétique, il est inévitable que des défauts surviennent avec le temps.

La réactivité face aux défauts est tout aussi importante. Les équipes de maintenance doivent être équipées pour répondre rapidement aux incidents et effectuer les réparations nécessaires afin de minimiser les perturbations du service. Une communication efficace avec les usagers est également essentielle pour les informer des perturbations prévues et des alternatives de transport disponibles.

Donc dans le chapitre suivant Nous aborderons de voir les méthodes de détection des défauts électriques standard (classique) et modern du Tramway pour améliorer la performance de la technique de détection ou bien la prédiction selon la nouvelle technologie de l'intelligence artificiel pour éviter l'arrêt d'exploitation et pour protéger les équipements.



CHAPITRE III :
LA DETECTION DES DEFAUTS
ELECTRIQUE DANS LE RESEAU
DU TRAMWAY



1. Introduction :

La détection des défauts dans les réseaux électriques joue un rôle important dans le bon fonctionnement des relais de protection. Lorsqu'un défaut survient dans une ligne de transmission, le courant de défaut est toujours supérieur au courant de charge nominal.

Plusieurs méthodes et techniques numériques conventionnelles ont été utilisées et proposées pour la détection de défauts.

Dans le chapitre précédent nous avons vu les types des défauts électriques et leur maintenance dans le système du tramway.

Les anciennes méthodes de mesure et de détection des défauts sont basées sur un prélèvement statistique ou la mise d'un échantillon sous des essais destructifs. Après le développement atteint par la technologie et l'émergence de la Digitalisation ce chapitre porte une spécification sur les méthodes modernes de détection de défauts dans les systèmes électriques qui est essentielle pour garantir leur bon fonctionnement et leur sécurité.

2. Généralité sur Les relais de protection :

Définition : Un relais de protection détecte l'existence de conditions anormales par la surveillance continue, détermine quels disjoncteurs ouvrir et énergisé les circuits de déclenchement.

Les relais de protection sont essentiels pour garantir la sécurité et la fiabilité des réseaux de distribution électrique.

Ils sont utilisés pour des applications telles que la détection des caténaires de tension, des courts- circuits, des surcharges et des défauts à la terre dans l'électronique de puissance de traction ou les sous-stations ferroviaires.

A. Les types des relais :

❖ Les fonctions de base :

- ✓ Relais de tension différentielle
- ✓ Relais à courant maximum

❖ Pour les applications embarquées :

- ✓ Relaisde surintensité de traction
- ✓ Relais de panne d'isolation de traction
- ✓ Relaisde surveillance de batterie

- ❖ Pour les applications au bord de la piste :
 - ✓ Relais de détection de courant directionnel (détection de courant inverse dans la distribution d'énergie)
 - ✓ Relais de détection de défaut à la terre de sous-station
 - ✓ Relais de surveillance par câble de traçage thermique
 - ✓ Relais de surcharge de courant (15 000 A)

B. Les avantages des relais :

- Séparation galvanique élevée
- Aucune alimentation auxiliaire nécessaire, autonome
- Haute fiabilité, aucun entretien grâce à une technologie électromécanique fiable et éprouvée
- Forte capacité à résister à des surcharges élevées



Figure III.1 : protection de phase.



Figure III.2 : protection de tension.

C. Système de protection à courant continu :

Lors de la conception d'une sous-station de traction pour un système ferroviaire de Tramway, gardez à l'esprit ces fonctions clés de protection CC :

- 1- Protection contre les sous-tensions (ANSI-127) : pour protéger contre les anomalies ou les pertes de tension continue pendant le fonctionnement du système.
- 2- Protection temporelle contre les surintensités (ANSI-151) : pour protéger contre les événements de surintensité de longue durée et de courte durée ainsi que d'autres considérations thermiques correspondantes.

3- Protection instantanée contre les surintensités (ANSI-150) : pour protéger contre les événements de surintensité associés aux défauts de court-circuit au cours d'une période instantanée. Il s'agit souvent d'un déclencheur à action directe intégré à l'ensemble disjoncteur avec des réglages de 100 % à 400

% de la valeur nominale du châssis du disjoncteur.

4- Protection contre les surintensités à taux de montée (ANSI-150RR) : pour protéger le système électrique en utilisant le taux d'augmentation du niveau de courant en fonction du temps [19].

Remarque : ANSI 127/ANSI-151/ANSI-150 /ANSI-150RR, Ils sont des Normes Internationales

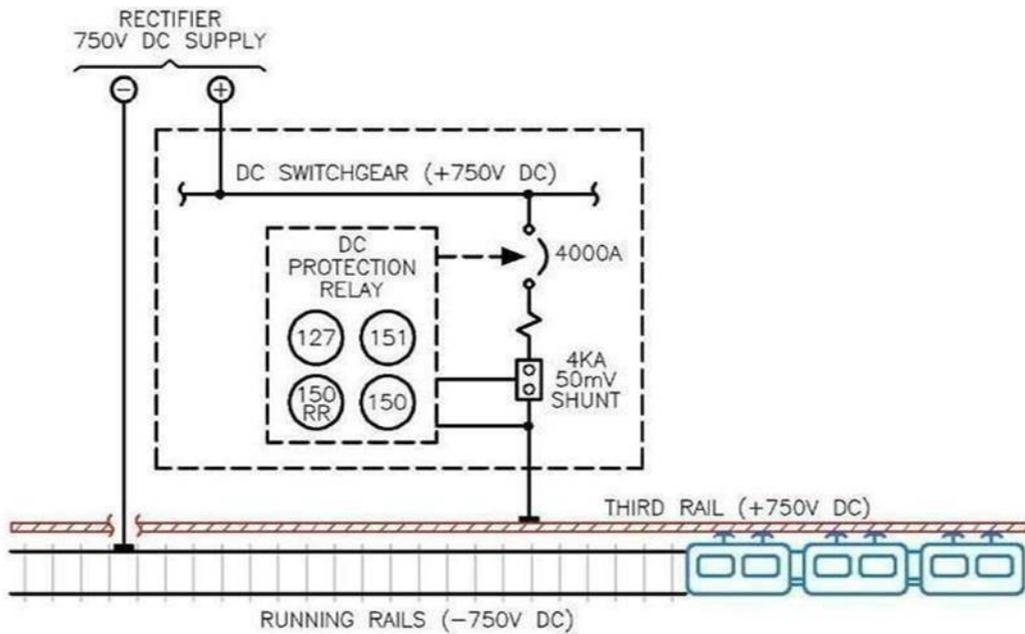


Figure III.3 : Schéma du système de protection DC. [34]

3. Les Méthodes de détection des défauts électrique dans le système Tramway :

3.1 Méthodes standard :

Détection des défauts à la terre par la surveillance d'isolement pour un système Ferroviaire (la solution de Bender) :

L'utilisation d'un système de surveillance prédictive de l'isolement de Bender signifie qu'à mesure qu'elle courant de fuite augmente et/ou la résistance d'isolement diminue, un défaut à la terre est provoqué et déclenchera ensuite une alarme et une impulsion de localisation du défaut.

Le système de localisation prédictive des défauts ferroviaires de Bender identifiera et localisera ces impulsions en temps réel en tant que défauts à la terre à l'emplacement réel sur le réseau électrique de signalisation ferroviaire. Les systèmes de surveillance de l'isolation de Bender peuvent également identifier des défauts émergents moins critiques à des limites d'intervention/isolation inférieures, qui sont plus difficiles à suivre et à localiser. Cela permet une détection plus précoce et une maintenance planifiée par rapport aux pannes imprévues dues aux interruptions de puissance du signal causées par des défauts à la terre. [13]

1) Principe de fonctionnement :

Le dispositif de surveillance des défauts à la terre est connecté aux conducteurs d'alimentation sous tension et à la terre. Tout comme un ohmmètre, il applique une tension entre ces points pour mesurer la résistance. En cas de défaut à la terre, le défaut ferme le circuit de mesure entre le système surveillé et la terre, permettant une mesure de résistance qui peut indiquer un défaut à la terre. Cette technique peut être utilisée sur les systèmes AC, DC et mixtes AC/DC.

Si la résistance d'isolement mesurée descend en dessous d'une valeur définie, une alarme est émise. Les détecteurs de défauts à la terre servent de systèmes d'alerte précoce, fournissant aux opérateurs les informations dont ils ont besoin pour planifier les mesures de maintenance appropriées. [14]

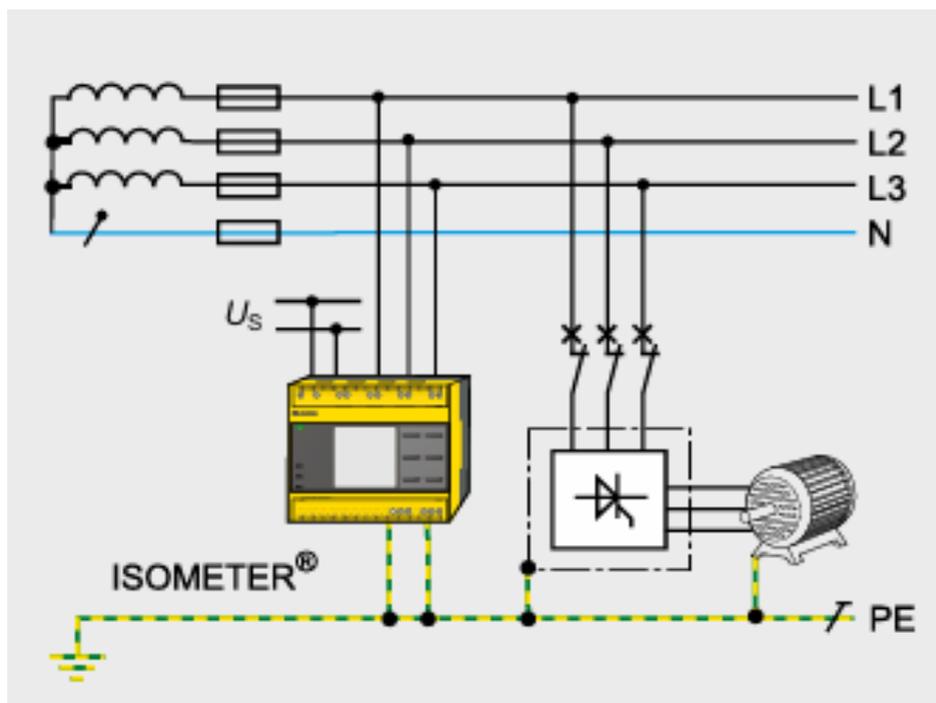


Figure III.4 : Surveillance de l'isolement dans un circuit principal AC/DC.

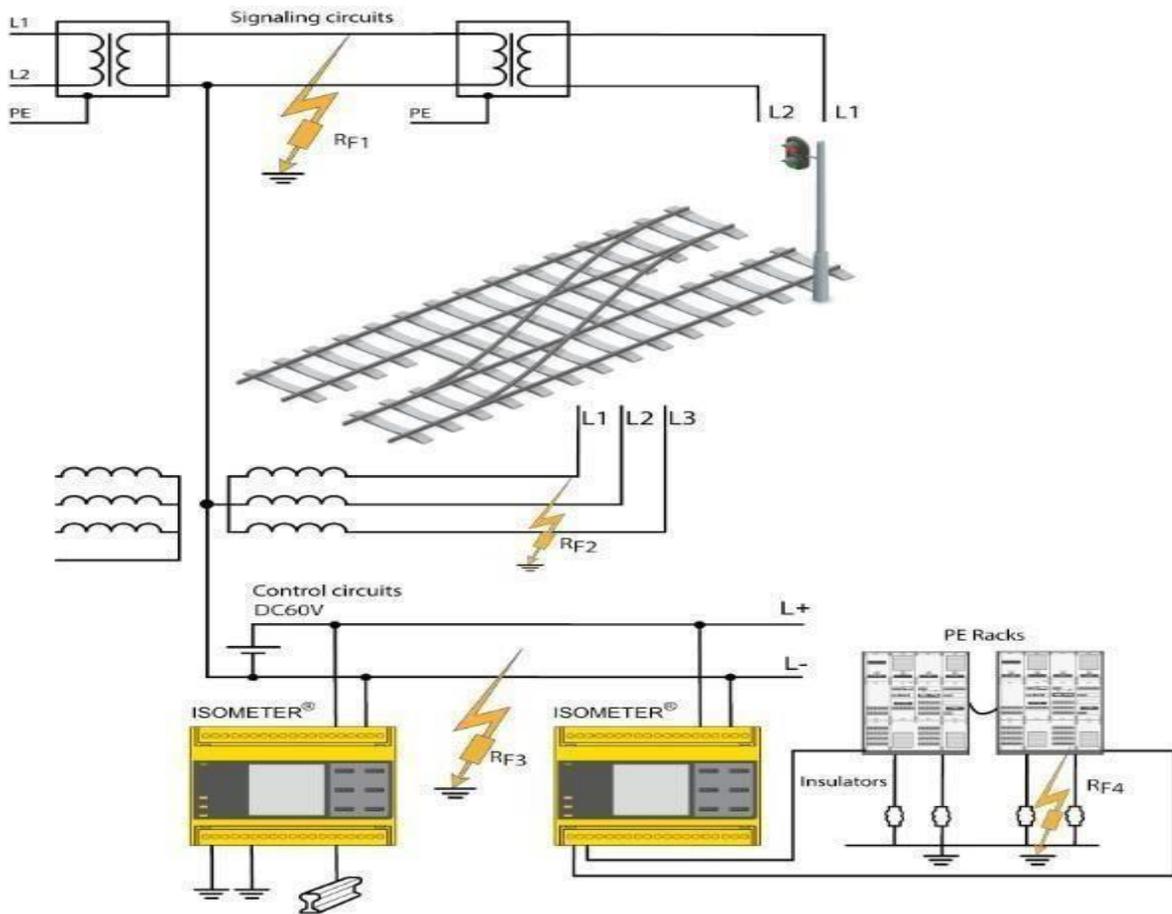


Figure III.5 : Schéma de fonctionnement de la solution de BENDER dans le système du Tramway.

a. Méthode de mesure CC appliquée :

Une tension CC de bas niveau est appliquée entre les conducteurs de phase du système et le conducteur de terre (liaison). Cette méthode de mesure convient à la surveillance des systèmes à courant alternatif tels que ceux équipés de moteurs à commande conventionnelle. Il ne convient pas aux systèmes avec des composants à courant continu, tels que ceux avec des moteurs contrôlés par des variateurs de vitesse.

b. Méthode de mesure AMP :

La méthode de mesure AMP brevetée s'adapte automatiquement au système surveillé. L'évaluation basée sur un logiciel filtre les courants de fuite inhérents et calcule avec précision la résistance d'isolement. Cela signifie que les interférences à large bande telles qu'elles se produisent, par exemple pendant le fonctionnement du convertisseur, n'affectent

Pas la détermination précise de la résistance d'isolement, ainsi les appareils prenant en charge cette méthode de mesure peuvent être utilisés universellement dans les systèmes AC, DC et AC/DC, tels que les systèmes avec des tensions ou des fréquences variables, des capacités de fuite système élevées ou des composants de tension continue.

c. Les avantages convaincants :

- ✓ Une recherche automatique de défauts d'isolement sous-tension – sans coupure de l'installation
- ✓ Un gain de temps et une réduction des coûts grâce à une localisation précise des défauts
- ✓ Administration centralisée grâce à un réseau LAN/WLAN
- ✓ La précocité de la détection de défauts permet de planifier la remise en état [15].

d. Appareille de mesure :

La recherche de défauts d'isolement dans des réseaux IT étendus est une entreprise qui demande du temps et qui est onéreuse.



Figure III.6: Contrôleur permanent d'isolement.



Figure III.7 : Bender ISOSCAN EDS440.

e. La surveillance SSTDR dans le secteur ferroviaire :

L'industrie ferroviaire est confrontée à de nombreux défis liés aux câbles électriques, qui entraînent des pannes de signalisation et des retards coûteux. Les câbles sont également exposés à des facteurs environnementaux vieillissants qui peuvent entraîner une dégradation de l'isolation et des fissures souvent à des court-circuit (défauts) intermittents lorsqu'ils sont exposés à l'humidité.

La technologie SSTDR est utilisée pour la surveillance en direct des câbles et la détection des dommages, permettant aux opérateurs de suivre les performances et d'identifier les défauts avant qu'ils ne provoquent une panne du système.

Les solutions de capteurs SSTDR sont des algorithmes exclusifs et des techniques de corrélation associés à des instruments de test et de mesure électriques qui développent la capacité d'envoyer et de recevoir des signaux à une vitesse allant jusqu'à 600 balayages par seconde. Ces retours sont ensuite traités pour déterminer leur signification et signaler l'événement à l'opérateur du système.

L'application la plus courante du SSTDR est la détection et la localisation en direct de défauts dans les câbles et fils électriques. Toute industrie qui utilise des systèmes électriques critiques peut appliquer une solution de capteur SSTDR pour surveiller les performances et détecter les défauts dans les câbles sous tension. [16]

f. Comment fonctionne la réflectométrie dans le domaine temporel (TDR) :

- TDR utilise la réflectométrie. Cela fonctionne de manière analogue au radar, où une impulsion radio est émise et se reflète sur un objet, et la réflexion est reçue et interprétée pour fournir des données telles que la distance, la vitesse et la direction.
- Il utilise la théorie des lignes de transmission et les principes de réflexion des impulsions pour détecter les changements dans les câbles électriques.
- Le TDR transmet des impulsions électriques à haute énergie le long du câble qui reflètent les changements d'impédance caractéristique.
- L'analyse de l'ampleur et de la forme de l'impulsion réfléchie permet de déterminer les caractéristiques du système et les défauts potentiels.
- Cependant, les applications du TDR sont limitées car sa précision est affectée par d'autres signaux sur la ligne.

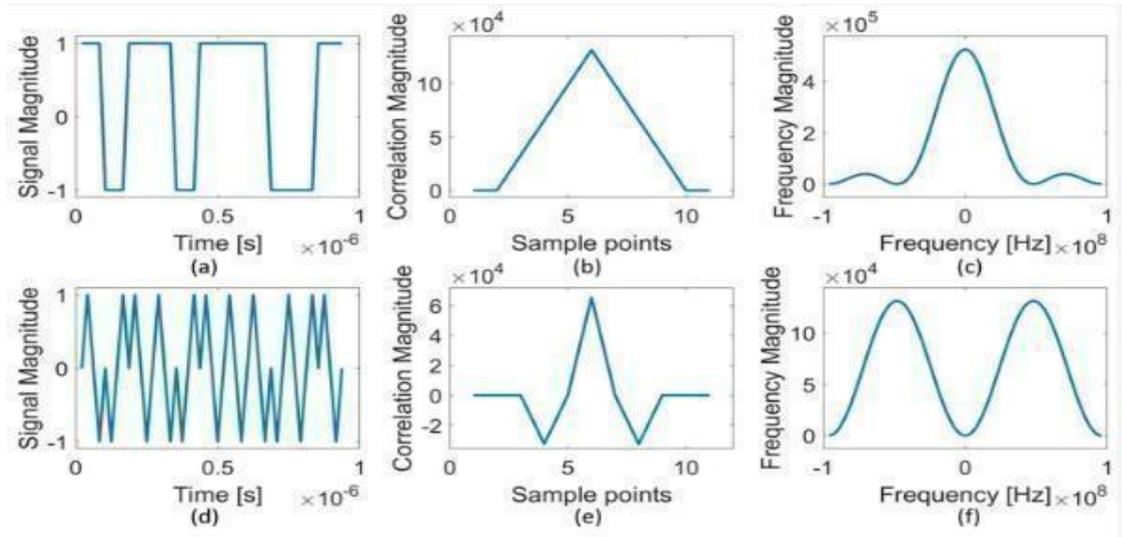


Figure III.8 : Réflectométrie dans le domaine temporel à spectre étalé.

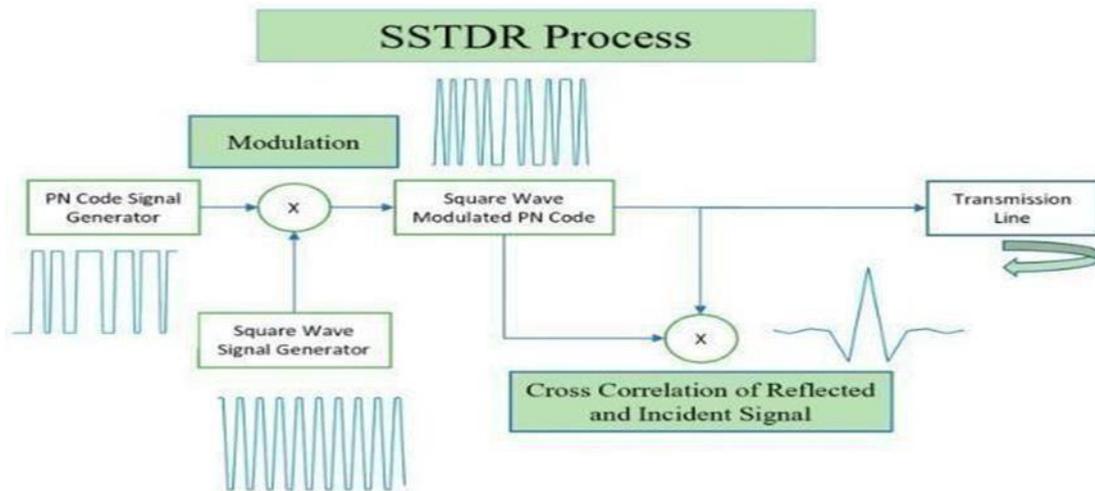


Figure III.9 : Processus SSTDR pour le signal incident, la réflexion et la corrélation croisée.

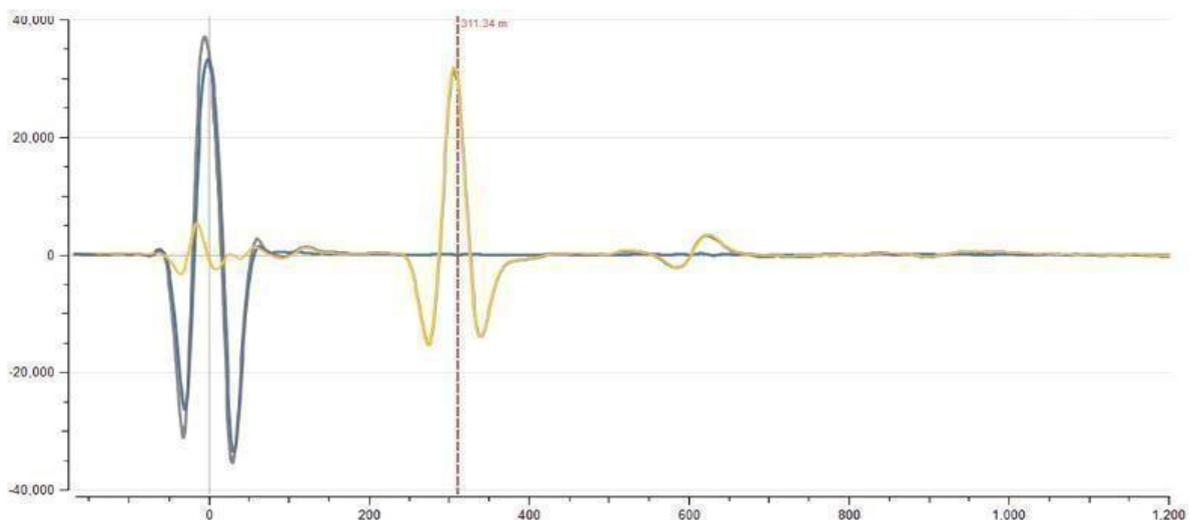


Figure III.10 : exemple sur un défaut dans un câble sur 311.34 mètres.

a. Les avantages de l'SSTDR :

SSTDR présente deux avantages clés. Ça peut :

- ✓ Déterminez les changements d'impédance qui ont un impact sur les performances, tels que les circuits ouverts et les courts-circuits, les défauts d'arc et les événements intermittents difficiles à voir.
- ✓ Fonctionnez sur des systèmes sous tension car les signaux à spectre étalé peuvent être isolés du bruit et de l'activité du système hôte.
- ❖ Les événements imprévus, tels que les pannes matérielles ou intermittentes, sont signalés. La surveillance en direct signifie que les événements et leur emplacement peuvent être enregistrés au fur et à mesure qu'ils se produisent et que la possibilité de collecter des données pour créer un profil ou une « signature » d'un système est possible.

3.2 Méthode de l'intelligence artificiel IA :

Les algorithmes d'intelligence artificielle, notamment les réseaux de neurones profonds et les techniques d'apprentissage automatique, peuvent détecter les défauts avec une précision élevée, souvent supérieure à celle des méthodes traditionnelles. Il permet d'automatiser le processus de détection des défauts, réduisant ainsi le besoin d'intervention humaine et accélérant le temps de détection, ainsi ils peuvent être entraînés pour détecter une grande variété de défauts, et ils peuvent s'adapter à de nouvelles situations et à des défauts inconnus grâce à leur capacité d'apprentissage continu.

g. Systèmes S&C ferroviaires :

ALSTOM GRID et S&C ELECTRIC COMPANY, experts mondiaux dans le domaine des réseaux électriques, ont annoncé la fourniture d'une solution intégrée combinant deux systèmes.

La prédiction du RUL d'un système S&C à l'aide d'une méthode basée sur les données a été réalisée pour la première fois par YILBOGA et AL une technique basée sur un réseau de neurones artificiels (ANN) a été utilisée comme algorithme d'apprentissage. Plus précisément, une méthode de réseau neuronal à retard (TDNN) a été utilisée pour estimer et prédire les valeurs futures des paramètres du système ferroviaire S&C sur la base d'informations passées et actuelles. Un TDNN a été choisi car sa structure d'entrée intègre des informations temporelles, ce qui le rend adapté aux problèmes liés au temps tels que la prédiction. [17].

Un système électromécanique de surveillance et de contrôle ferroviaire a été envisagé et différents capteurs ont été installés et leurs signaux analysés.

L'analyse a révélé que le capteur de force contenait les informations les plus précieuses sur

La santé du système d'aiguillage jusqu'à sa défaillance, comme le montre la figure (III.11)

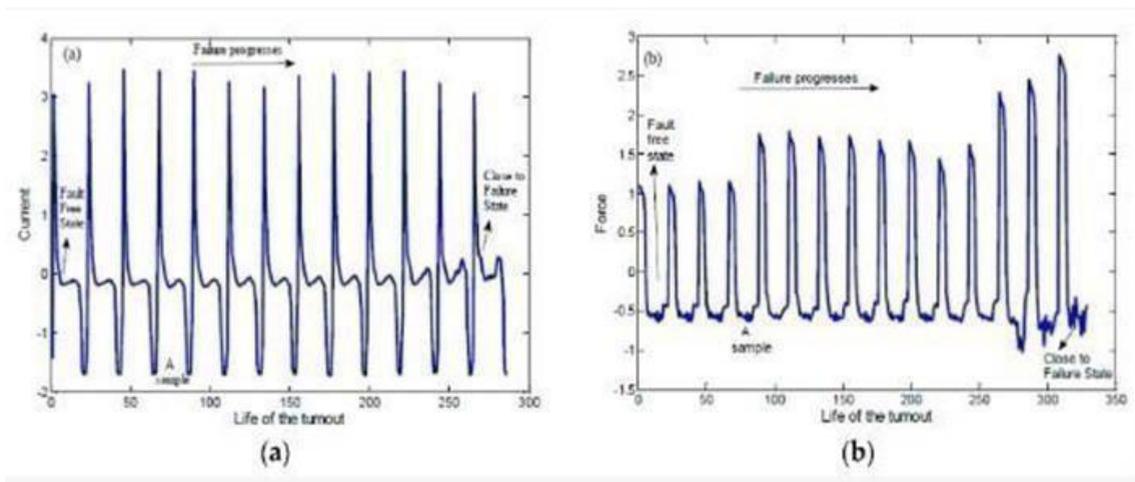


Figure III.11 : Deux signaux avec progression de la défaillance de l'état sain à l'état proche de la défaillance.

Signal de courant, (b) signal de force

- **Sélection des mesures :**

L'ensemble complet de données contient plus de 100 mesures complexes, incluant accélération, vitesse des trains et déplacements des rails. Ces mesures ont été prises sur des trains traversant des passages à niveau dans plusieurs gares. Pour construire un bon classificateur, des données identiques ou très similaires sont nécessaires.

- **Les Méthodes de S&C système :**

(i) Les méthodes temps-fréquence complexes, (ii) les méthodes basées sur un traitement statistique, et

(iii) la combinaison des deux mentionnées précédemment.

- Le premier groupe analyse le signal simultanément dans les domaines temporel et fréquentiel. Il existe plusieurs fonctions de distribution temps-fréquence, telles que la transformée en ondelettes (WT), la transformée de Wigner – Ville (WVT) et la transformée de Fourier à court terme (STFT).

Grâce à ces méthodes, il est possible d'effectuer une analyse suffisamment détaillée de la réponse en fréquence de la structure pour révéler des différences mineures dans les signaux individuels pouvant suggérer l'existence de défauts de véhicules et de voies.

- Le deuxième groupe de méthodes d'analyse peut être utilisé comme alternative et repose sur un traitement statistique. Par exemple, il est possible, avec ces méthodes, d'évaluer les amplitudes maximales, ainsi que leur nombre, leur écart type et leur variance à long et court terme.

Ce groupe de méthodes est, par essence, à l'opposé des méthodes temps-fréquence car elles sont peu sensibles aux signaux d'entrée imparfaits, leur difficulté de calcul est négligeable (par rapport au premier groupe de méthodes), et le dispositif construit en conséquence peut être peu coûteux. Cependant, le principal inconvénient du deuxième groupe est qu'il existe des informations limitées dans le domaine fréquentiel, ce qui signifie que la détection d'éventuels défauts peut être trop tardive pour être utile.

iii. Les méthodes du troisième groupe sont une combinaison des deux approches évoquées précédemment, permettant d'analyser le domaine temporel du signal par des méthodes statistiques.

Dans les zones d'intérêt identifiées (par exemple, les essieux à amplitude maximale), une simple analyse de fréquence peut être effectuée en utilisant le spectre de fréquence de la sous-section de signal sélectionnée et ses propriétés statistiques.

Cette méthode est avantageuse pour notre recherche car elle est économe en performances informatiques tout en étant capable de décrire adéquatement le signal. [18]

• **Évaluation du signal dans le domaine temporel à l'aide de méthodes statistiques :**

L'utilisation de méthodes statistiques s'inspire de recherches antérieures axées sur la détection et la classification des trains. Cette méthode innovante évalue l'enregistrement de l'accéléromètre comme une variance fenêtrée de l'accélération, basée sur 12 à 20 enregistrements à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz, une sensibilité de ± 4 g et une résolution de 10 bits. Malgré la résolution minimaliste

(Ainsi que les exigences minimales en matière de puissance et de matériel).

Le système peut obtenir des résultats très précis ainsi que détecter et classer les trains avec une précision de plus de 95 %. Il a une capacité de batterie de 180 mAh (unités de pourcentage de la capacité d'une batterie de smart phone classique), permettant à l'appareil de prendre des mesures pendant environ deux semaines. Une carte SD est utilisée pour stocker les résultats. Comme les Figure III.12 et III.13 indique : Variation fenêtrée du signal du train LEO Express (trois passages). Taille de la fenêtre : nombre d'échantillons/300. En haut : valeur de variance fenêtrée. Milieu : fenêtré maximum. En bas : moyenne fenêtrée

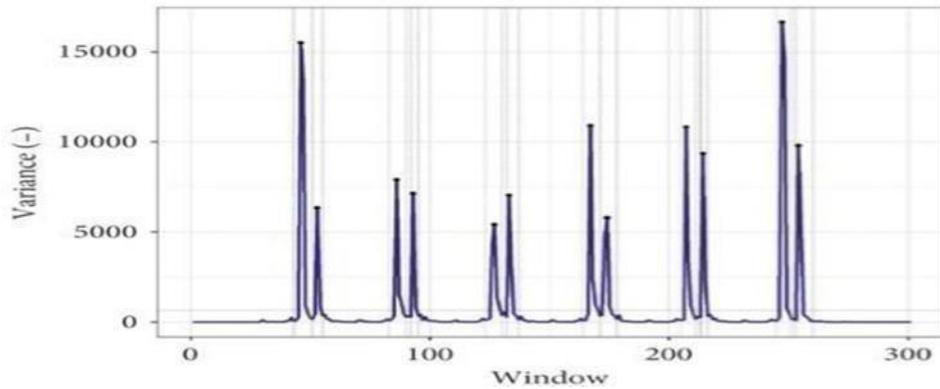


Figure III.12 : Détection de pic de variance fenêtrée.

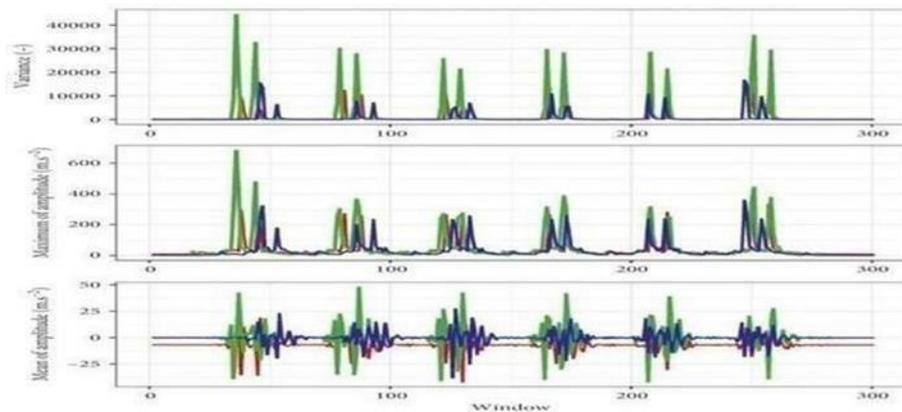
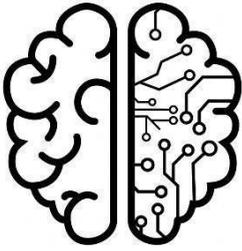


Figure 13 : Évaluation du signal dans le domaine fréquentiel à l'aide de méthodes statistiques.

4. Conclusion :

La détection des défauts par l'intelligence artificielle offre une avancée significative dans de nombreux secteurs industriels, en identifiant les défauts dès le début du processus de fabrication, l'IA peut contribuer à améliorer la qualité globale des produits et la satisfaction des clients. Mais malgré ses avantages, la mise en œuvre réussie de la détection des défauts par l'IA peut être entravée par des défis tels que le besoin de données de haute qualité pour l'entraînement des modèles, la complexité des algorithmes, et la nécessité de garantir la transparence et l'interopérabilité des décisions prises par les modèles d'IA.

En fin de compte, la détection des défauts par l'intelligence artificielle présente un énorme potentiel pour améliorer l'efficacité, la qualité et la fiabilité des processus de production dans divers secteurs industriels, mais elle nécessite une approche réfléchie et une gestion appropriée des défis associés pour maximiser ses avantages. En fin de compte dans le chapitre suivant nous analyserons une expérience de simulation utilisant MATLAB @SIMULINK pour détecter les défauts électriques dans le réseau tramway et la comparerons avec les données obtenues de la société SETRAM.



CHAPITRE IV :
APPLICATION DE L'IA SUR LES DEFAUTS
ELECTRIQUE DU TRAMWAY



1. Introduction :

La simulation va nous permettre de confronter les données simulées avec les données réelles. Pour détecter et prévenir ces défauts électriques, les réseaux de tramway utilisent souvent des systèmes de surveillance en temps réel, des inspections régulières, des tests de résistance d'isolement, des dispositifs de protection contre les surintensités et d'autres techniques de maintenance préventive. Mais après l'émergence de l'intelligence artificielle, la technologie électrique a connu un énorme progrès. Nous avons donc proposé d'intégrer l'intelligence au système électrique du tramway pour garantir la stabilité d'exploitation, et à maintenir la fiabilité du service et à prolonger la durée de vie des équipements électriques du réseau de tramway.

Dans ce chapitre, nous réaliserons une simulation sur la détection des défauts électriques au système de tramway à l'aide du logiciel Matlab –Simulink avec l'application de la méthode Apprenant en classification (classification learner).

Les résultats obtenus seront comparés avec la méthode actuellement en cours dans l'entreprise.

2. Modélisation et simulation :

On présente ci-dessous le schéma bloc du de fonctionnement tramway réalisé à l'aide de Simulink :

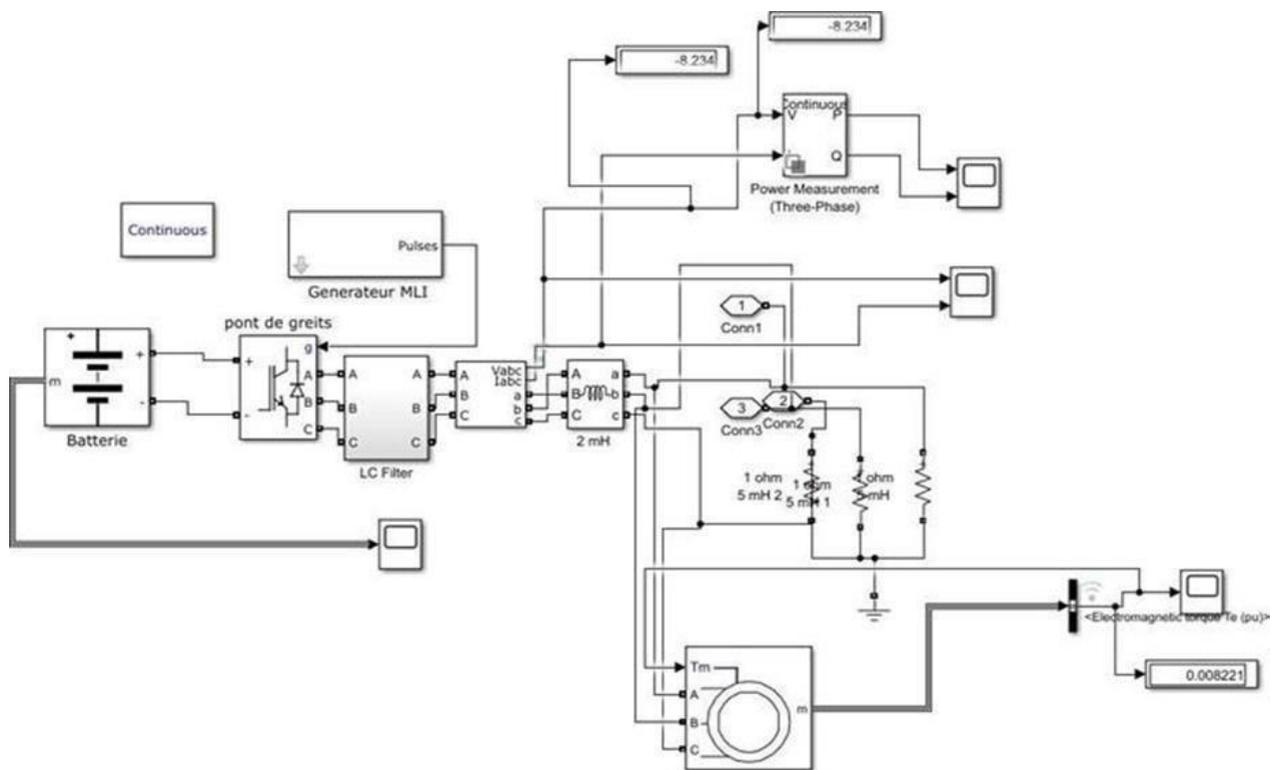


Figure IV.1 : schéma global de tramway

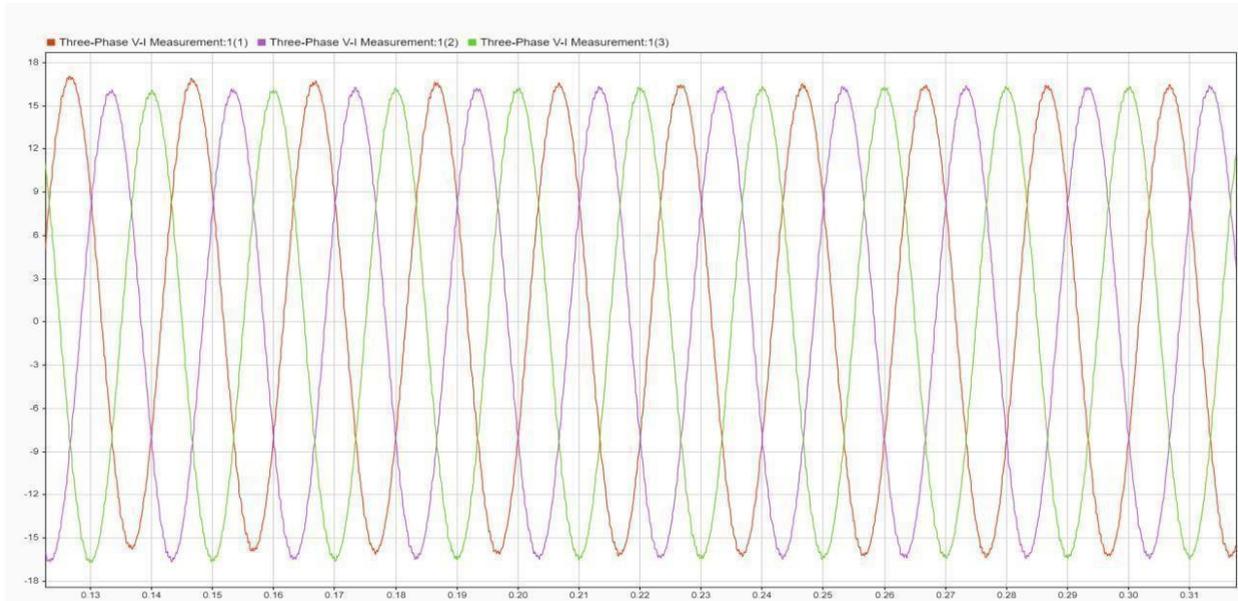


Figure IV.2: mesure du Tension U

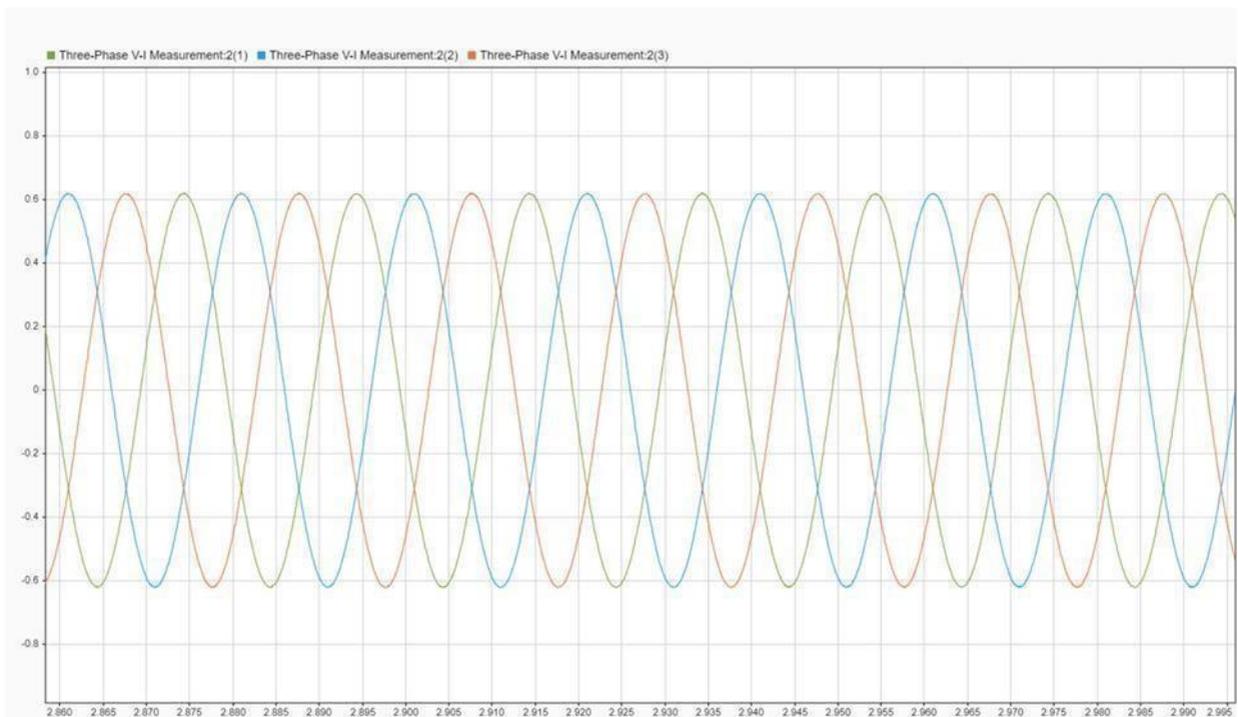


Figure IV.3 : mesure du Courant I

- Cette figure illustre des mesures de tensions (U) et de courant (I) triphasées avec un comportement sinusoïdal normalisé.

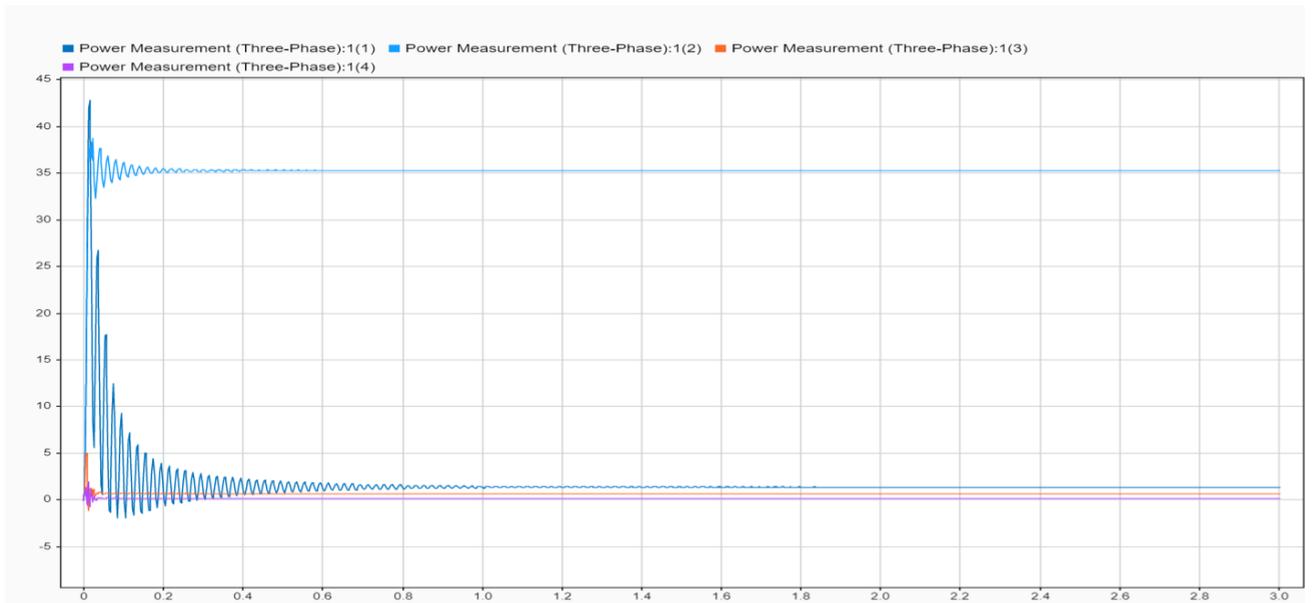


Figure IV.4 : mesure des Puissance active P et réactive Q

- On remarque dans la figure ci-dessus que la puissance active est stable autour de sa valeur nominale et la puissance réactive est minimal

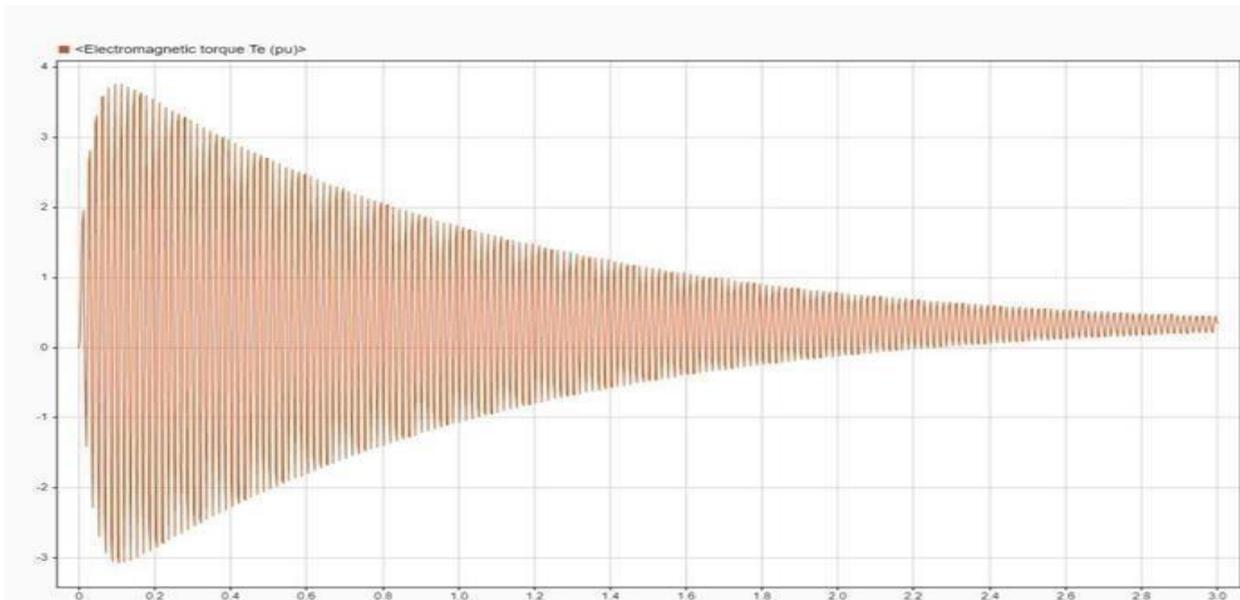


Figure IV.5 : mesure la vitesse V

- La vitesse après amortissement d'elle se stabilise à sa valeur nominale un PU

Création de défaut court -circuit triphasé En injecte le défaut électrique entre [1s 2s] :

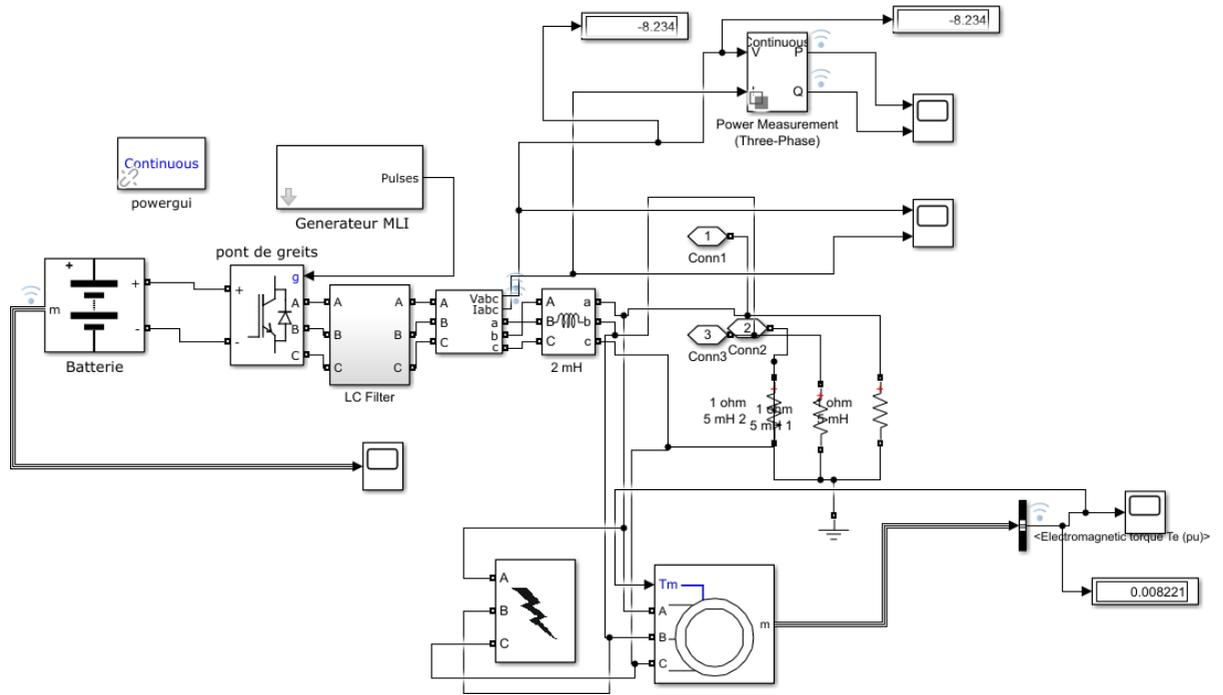


Figure IV.6 : schéma global de tramway par le défaut électrique

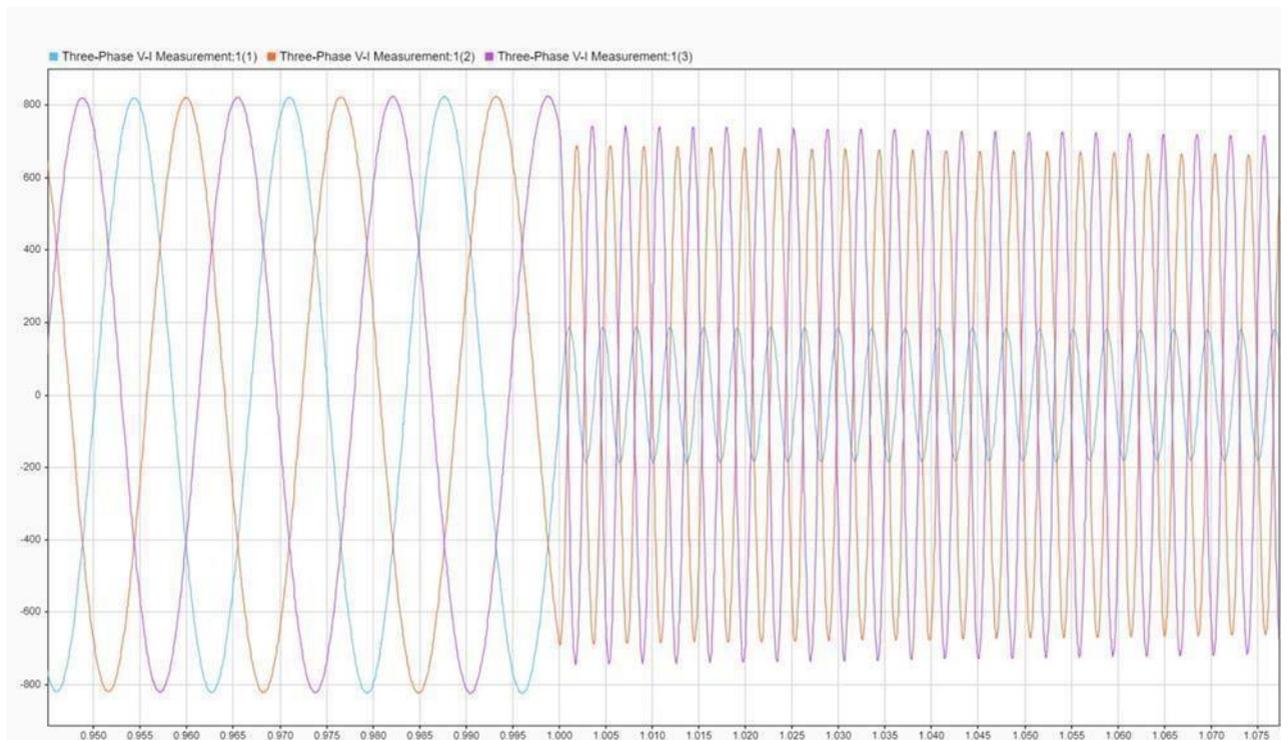


Figure IV.7 : schéma de tension V cas de défaut

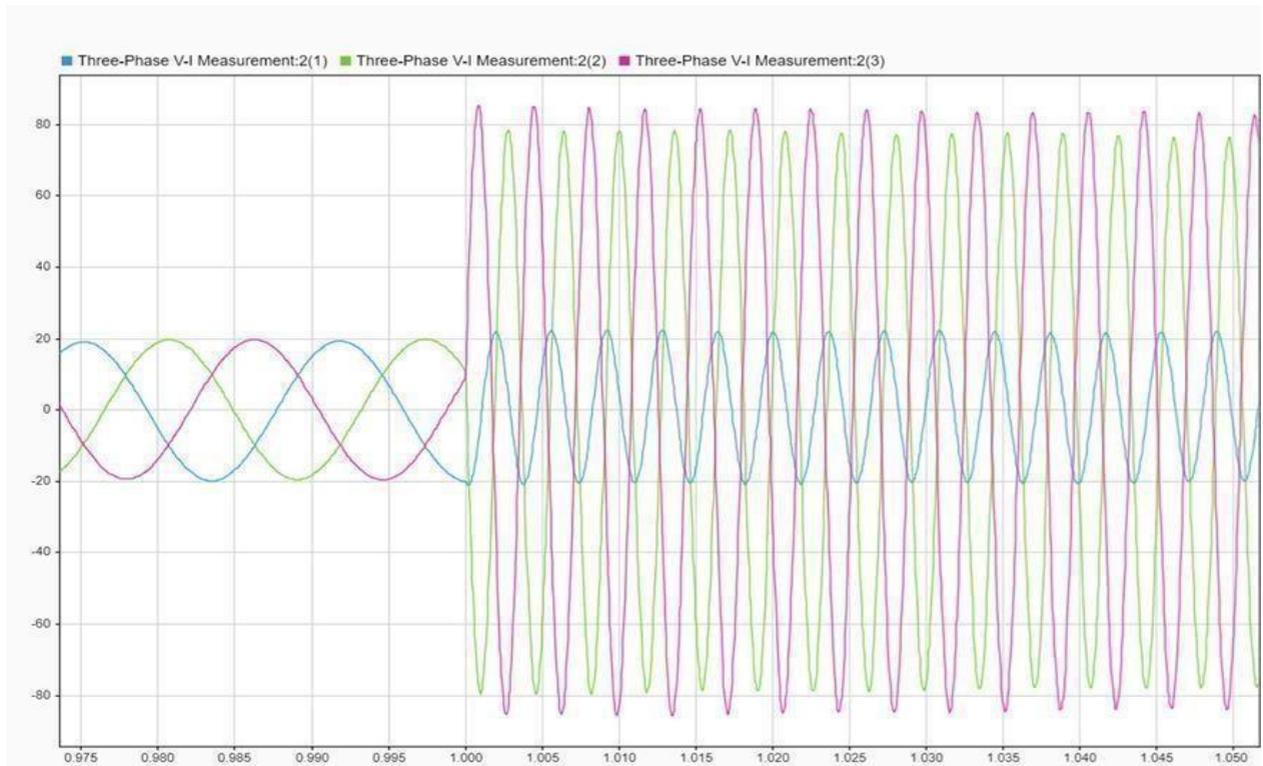


Figure IV.8: schéma de courant I cas de défaut

- Les graphiques U(t) et I(t) montre clairement l'impact d'un défaut électrique majeur sur un système triphasé.
- La perturbation au point de défaut entrainement une hausse drastique de valeurs de tension et de courant, ce qui est typique dans des situations de court-circuit.



Figure IV.9 : V amont et V aval

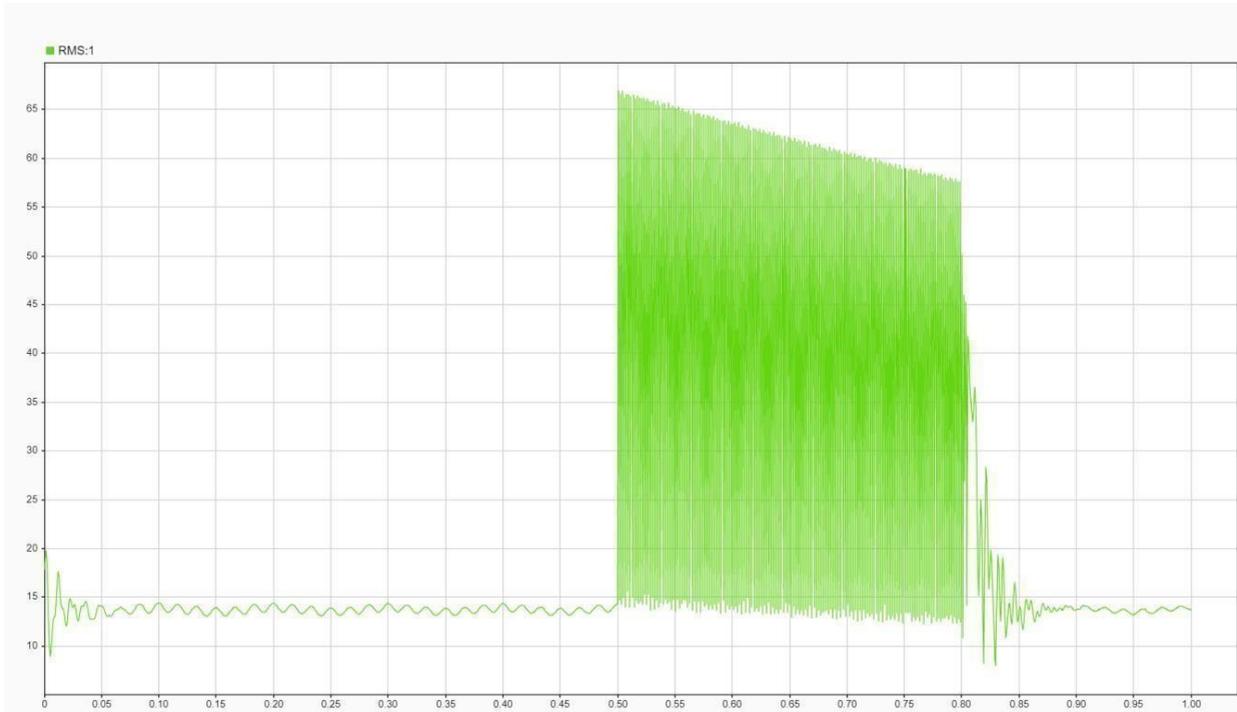


Figure IV.10 : Courant de court-circuit

La figure (54) montre clairement l'impact d'un défaut électrique sur les mesures de puissance dans un système triphasé. Le pic soudain et les oscillations suivantes après le défaut signalent une perturbation importante du système nécessitant.

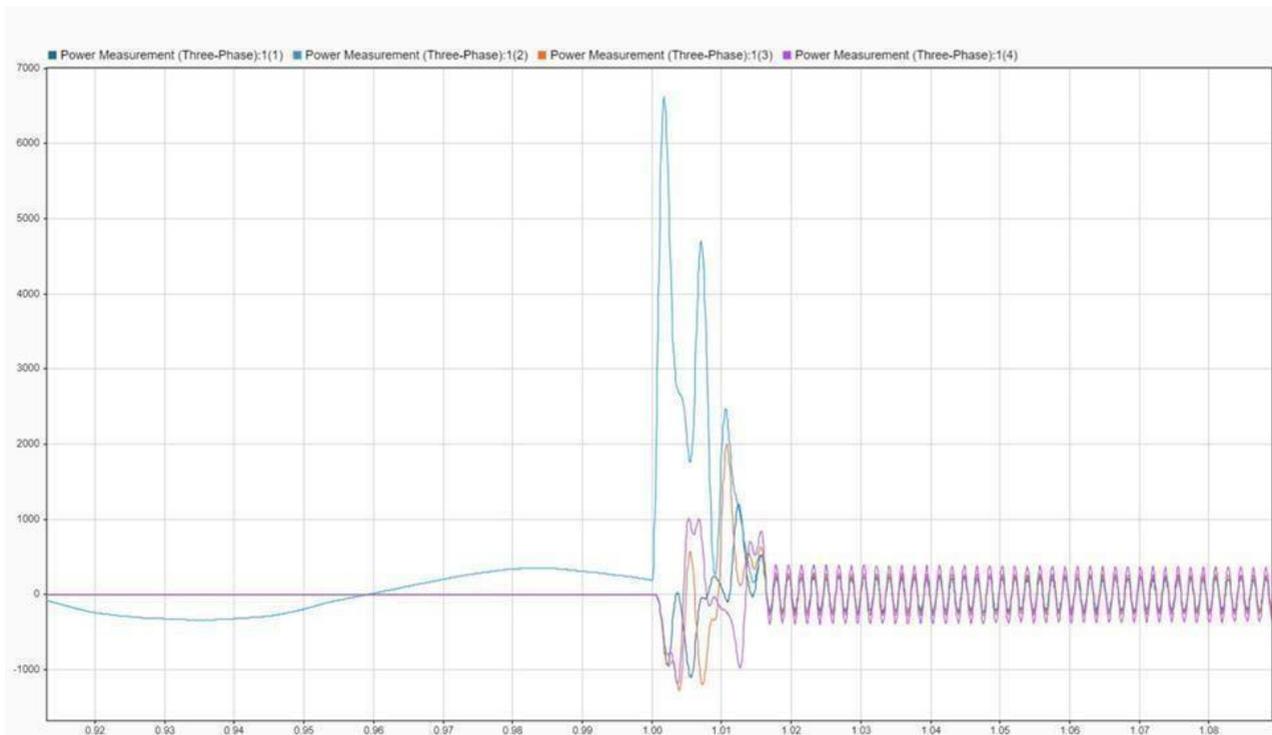


Figure IV.11 : schéma de Puissance cas de défaut

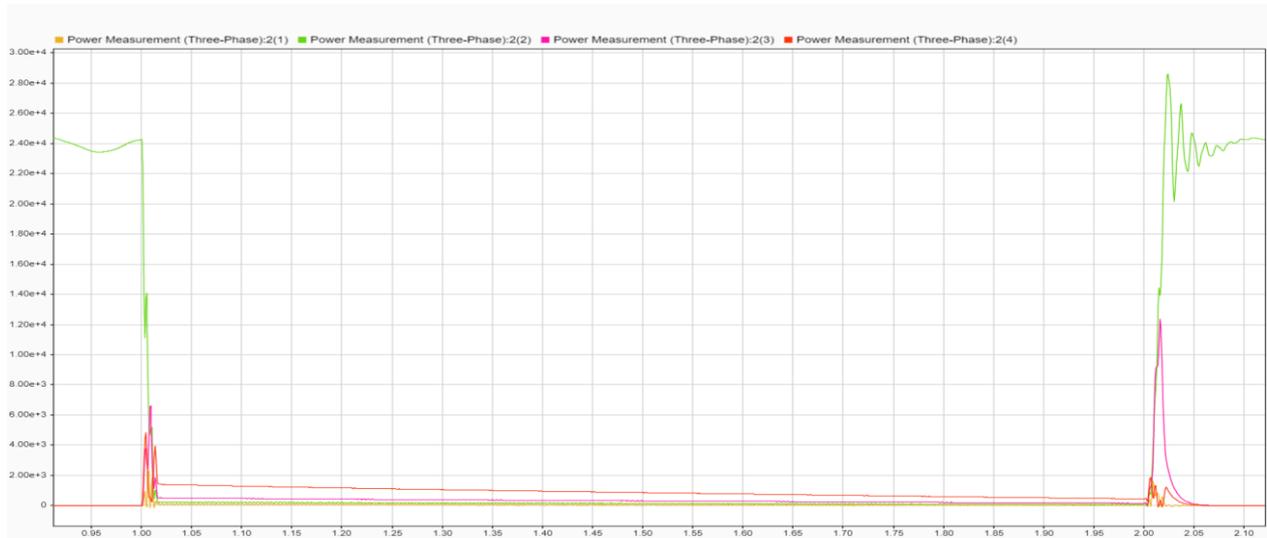


Figure IV.12 : schéma de la puissance réactive Q

- La figure (56) illustre les effets d'un défaut électrique sur la puissance réactive dans un système triphasé. L'apparition d'un défaut provoque une augmentation brusque de la puissance réactive suivie de fortes oscillations. Ces oscillations représentent la réponse transitoire du système tentant de revenir à un état stable après la perturbation.

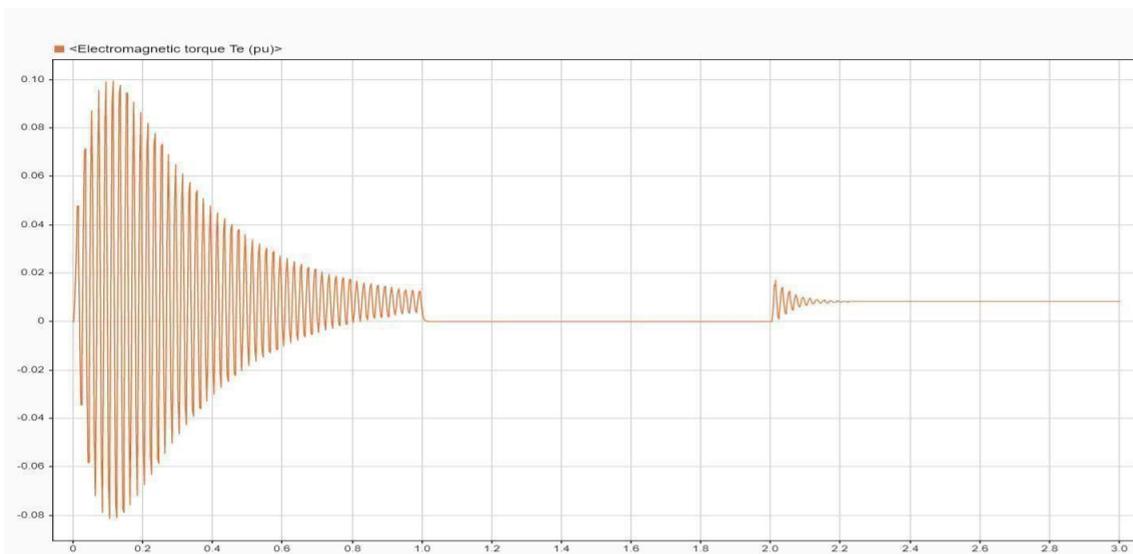


Figure IV.13 : variation de couple

- Cette Figure (57) présente le schéma de couple. Le graphique montre l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps, illustrant le comportement dynamique du système lors de l'avènement de défaut.

3. Le programme utilisé :

MATLAB @SIMULINK : La structure du système au niveau supérieur d'un modèle Simulink® est un contexte courant que de nombreuses équipes d'ingénierie peuvent utiliser et constitue la base de nombreuses tâches dans le paradigme de l'approche Model-Based Design : analyse, design, test et implémentation. Définissez un système au niveau supérieur en identifiant la structure et les composants individuels. Organisez ensuite votre modèle d'une manière hiérarchique qui correspond aux composants. Définissez ensuite des interfaces pour chaque composant et les connexions entre les composants. [20]

4. Les définitions :

4.1 Apprenant en classification (Classification Learner) :

La classification est une méthode d'apprentissage automatique supervisée dans laquelle le modèle tente de prédire l'étiquette correcte d'une donnée d'entrée donnée. Lors de la classification, le modèle est entièrement entraîné à l'aide des données d'entraînement, puis il est évalué sur des données de test avant d'être utilisé pour effectuer des prédictions sur de nouvelles données invisibles. [21]

4.2 Ingénierie des fonctionnalités (Feature Engineering) :

L'Ingénierie des fonctionnalités est un processus qui consiste à transformer les données brutes en caractéristiques représentant plus précisément le problème sous-jacent au modèle prédictif. Pour faire simple, il s'agit d'appliquer une connaissance du domaine pour extraire des représentations analytiques à partir des données brutes et de les préparer pour le Machine Learning.

En utilise le fonction « ZSCORE » pour normalise la base des données brute

$Z = \text{renvois ZSCORE}(X)$

Le score Z pour chaque élément de tel que les colonnes de son centré pour avoir une moyenne de 0 et mis à l'échelle pour avoir un écart-type de 1 est de la même taille que $XXZX$

- Si est un vecteur, alors est un vecteur de scores Z . XZ
- Si est une matrice, alors est une matrice de la même taille que, et chaque colonne du a une moyenne de 0 et un écart

Pour les tableaux multidimensionnels, z -scores sont calculés le long de la première dimension non singleton de ZX [22]

5. Les méthodes de classification :

5.1 Transformer des entités avec PCA dans Apprenant en classification :

Utilisez l'analyse en composantes principales (PCA) pour réduire la dimensionnalité de l'espace de prédiction. La réduction de la dimensionnalité peut créer des modèles de classification dans classification Learner qui aide à prévenir le sur apprentissage.

Transformations linéaires de PCA afin de supprimer les dimensions redondantes, et génère un nouvel ensemble de variables appelées composantes principales.

- Sous l'onglet Apprendre, dans la section Options, sélectionnez ACP.
- Dans la boîte de dialogue Options PCA par défaut, sélectionnez l'icône Activer case à cocher PCA, puis cliquez sur Enregistrer et Postulez.

L'application applique les modifications à tous les modèles de dépouille existants dans le volet Modèles et aux nouveaux modèles de dépouille que vous créez à l'aide de la galerie de la section Modèles de l'onglet Apprendre.

- Lorsque vous entraînez un modèle à l'aide du bouton Entraîner tout, la fonction transforme votre avant d'entraîner le classifier PCA

Par défaut, l'ACP ne conserve que les composants qui expliquent 95% de la variance. Dans la boîte de dialogue Options PCA par défaut, vous pouvez modifier le paramètre pourcentage de type 1 XZXZ

Variance à expliquer en sélectionnant l'option Expliqué valeur de variance. Une valeur plus élevée risque de sur apprentissage, tandis qu'une valeur plus élevée une valeur inférieure risque de supprimer des dimensions utiles.

- Si vous souhaitez limiter manuellement le nombre de composants PCA, sélectionnez-le dans la liste Critère de réduction des composants. Sélectionnez la valeur Nombre de composants numériques. Le numéro des composantes ne peut pas être plus grandes quel nombre de prédicteurs numériques. L'ACP n'est pas appliquée aux prédicteurs catégoriels. Spécifiez le nombre de composants. [23]

5.1.1 Les avantages PCA :

L'utilisation de l'analyse en composantes principales (PCA) dans l'outil Apprenant en classification de MATLAB offre plusieurs avantages :

1. **Réduction de la dimensionnalité** : PCA réduit le nombre de variables en les transformant en composantes principales. Cela est particulièrement utile avec des ensembles de données de haute dimension, car cela peut réduire considérablement la complexité computationnelle et l'utilisation de la mémoire.

2. **Amélioration des performances du modèle** : En éliminant les caractéristiques redondantes et bruyantes, PCA peut améliorer les performances des modèles d'apprentissage automatique. Elle aide à se concentrer sur les caractéristiques les plus pertinentes, ce qui peut conduire à une meilleure précision et généralisation.
3. **Visualisation** : PCA peut transformer des données de haute dimension en un espace de dimension inférieure (souvent 2D ou 3D), facilitant ainsi la visualisation des données. Cela peut aider à comprendre la structure et la distribution des données et à identifier des motifs ou des clusters.
4. **Indépendance des caractéristiques** : Les composantes principales sont orthogonales, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas corrélées entre elles. Cela peut être bénéfique pour les algorithmes qui supposent l'indépendance des caractéristiques, améliorant ainsi leurs performances et leur stabilité.
5. **Réduction du bruit** : En conservant uniquement les composantes principales les plus significatives, PCA peut réduire l'impact du bruit dans les données. Cela est particulièrement utile lorsque l'ensemble de données contient de nombreuses caractéristiques non pertinentes ou bruyantes.
6. **Prévention du sur apprentissage** : La réduction du nombre de caractéristiques grâce à PCA peut aider à prévenir le sur apprentissage, surtout dans les cas où le nombre de caractéristiques est beaucoup plus grand que le nombre d'observations.
7. **Efficacité** : Avec moins de caractéristiques, les temps d'entraînement et de prédiction des modèles d'apprentissage automatique peuvent être considérablement réduits. Cela est particulièrement avantageux pour les applications en temps réel ou à grande échelle.
8. **Interprétation du modèle** : PCA peut fournir des informations sur l'importance des différentes caractéristiques. En examinant les coefficients des composantes principales, on peut comprendre quelles caractéristiques d'origine contribuent le plus à la variance des données [24]

5.2 Comprendre la validation croisée :

La validation croisée détermine la précision de votre modèle d'apprentissage automatique en partitionnant les données en deux groupes différents, appelés ensemble d'entraînement et ensemble de test. Les données sont ensuite séparées aléatoirement en un certain nombre de groupes ou sous-ensembles appelés FOLDS.

Chaque folds contient environ la même quantité de données. Le nombre de folds utilisés dépend de facteurs tels que la taille, le type de données et le modèle. Par exemple, si vous séparez vos données en 5 sous-ensembles ou folds, vous utiliseriez neuf comme groupe d'entraînement et seulement un comme groupe de test. Répétez le processus autant de fois que vous avez de folds dans ce cas, vous effectueriez l'entraînement/test un total de 5 fois. Après avoir répété le processus (appelé itération) 5 fois, vous agrégerez les résultats pour créer une estimation unique du modèle.

Cette estimation fournit une évaluation de la performance de votre modèle sur des données nouvelles et non vues. [25]

5.3 Classification KNN :

Classification KNN est un modèle de classification du plus proche voisin dans lequel vous pouvez modifier à la fois la métrique de distance et le nombre de voisins les plus proches. Comme un classifieur stocke des données d'entraînement, vous pouvez utiliser le modèle pour calculer les prédictions de substitution. Vous pouvez également utiliser le modèle pour classer les nouvelles observations à l'aide de la méthode de prédiction. [26]

Tableau IV.5 : Apprenant en classification (Classification Learner).

Modèle	Précision	Temps de traitement
KNN	99,0%	249,33 s

5.4 Matrice de confusion :

Une matrice de confusion est une matrice qui résume les performances d'un modèle d'apprentissage automatique sur un ensemble de données de test. Il s'agit d'un moyen d'afficher le nombre d'instances exactes et inexactes en fonction des prédictions du modèle.

Il est souvent utilisé pour mesurer les performances des modèles de classification, qui visent à prédire une étiquette catégorielle pour chaque instance d'entrée. La matrice affiche le nombre d'instances produites par le modèle sur les données de test. [27]

- ✓ **Vrais positifs (TP)** : se produisent lorsque le modèle prédit avec précision un point de données positif.
- ✓ **Vrais négatifs (TN)** : se produisent lorsque le modèle prédit avec précision un point de données négatif.
- ✓ **Faux positifs (FP)** : se produisent lorsque le modèle prédit un point de données positif de manière incorrecte.
- ✓ **Faux négatifs (FN)** : se produisent lorsque le modèle prédit mal un point de données négatif.

5.4.1 Matrice de confusion pour la classification binaire :

Une matrice de confusion 2X2 est illustrée ci-dessous pour la reconnaissance d'image ayant une image de chien ou une image de non-chien.

Tableau IV.6 : Matrice de confusion

		Réal	
		Chien	Pas de chien
Prédit	Chien	Vrai positive(TP)	Fauxpositive (FP)
	Pas de chien	Faux négative (FN)	Négative réel (TN)

- ✓ **Vrai positif (TP)** : Il s'agit du nombre total de valeurs ayant à la fois des valeurs prédites et réelles qui sont Chien.
- ✓ **Vrai négatif (TN)** : Il s'agit du nombre total de comptes ayant à la fois des valeurs prédites et réelles qui ne sont pas des chiens.
- ✓ **Faux positif (FP)** : C'est le nombre total de comptes ayant une prédiction est Chien alors qu'il n'est en fait pas Chien.
- ✓ **Faux négatif (FN)** : C'est le nombre total de personnes dont la prédiction n'est pas Chien alors qu'en réalité, c'est Chien.

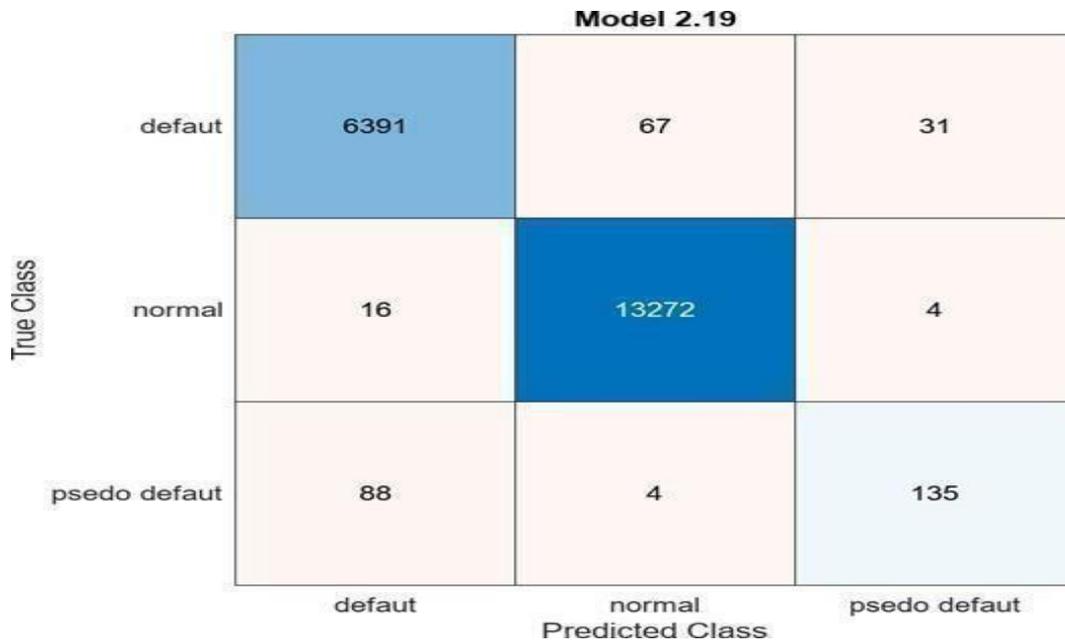


Figure IV.14 : Matrice de confusion Simulink

6. SCATTER :

Étant donné que vos données d'entrée sont dispersées, vous allez vouloir utiliser scattered Interpolant. Cela permet l'interpolation de données d'entrée non uniformément espacées. Pour vos données spécifiques, vous utiliserez quelque chose de similaire à ce qui suit où XQ, YQ et ZQ sont les points auxquels vous souhaitez interpoler l'entrée. S = dispersé Interpolant (x ; y ; z ; d) [28]

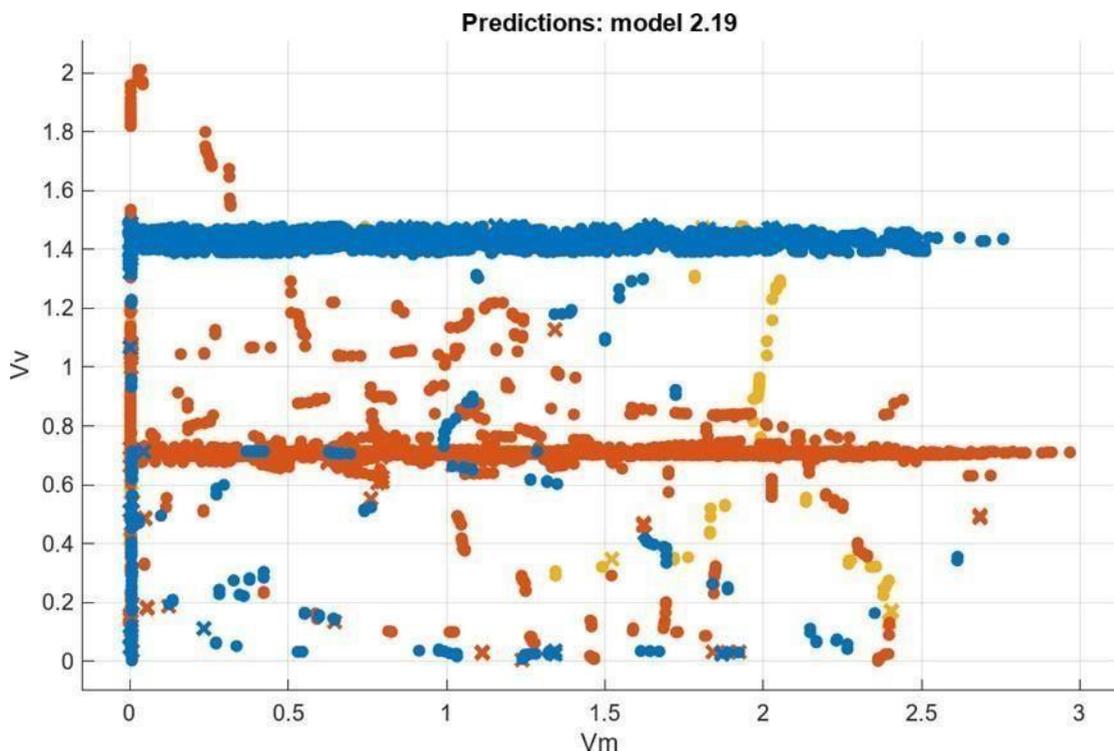


Figure IV.15 : classification SCATTER Simulink

7. ROC courbe :

Les courbes ROC (courbes caractéristiques de fonctionnement du récepteur) sont un outil important pour évaluer les performances d'un modèle d'apprentissage automatique. Ils sont le plus souvent utilisés pour les problèmes de classification binaire – ceux qui ont deux classes de sortie distinctes. La courbe ROC montre la relation entre le taux de vrais positifs (TPR) pour le modèle et le taux de faux positifs (FPR). Le TPR est le taux auquel le classificateur prédit « positif » pour les observations « positives ». Le FPR est la vitesse à laquelle le classificateur prédit « positif » pour les observations qui sont en fait « négatives ». Un classificateur parfait aura un TPR de 1 et un FPR de 0. [29]

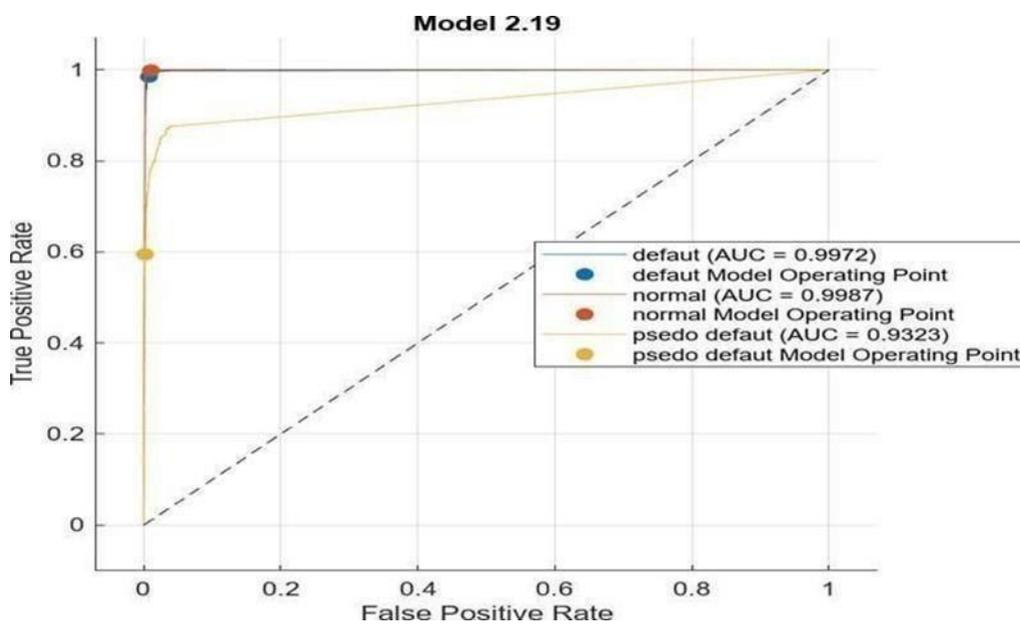


Figure IV.16 : ROC courbe Simulink

➤ Nous avons pris des données depuis la société SETRAM d'un cas réel de défaut

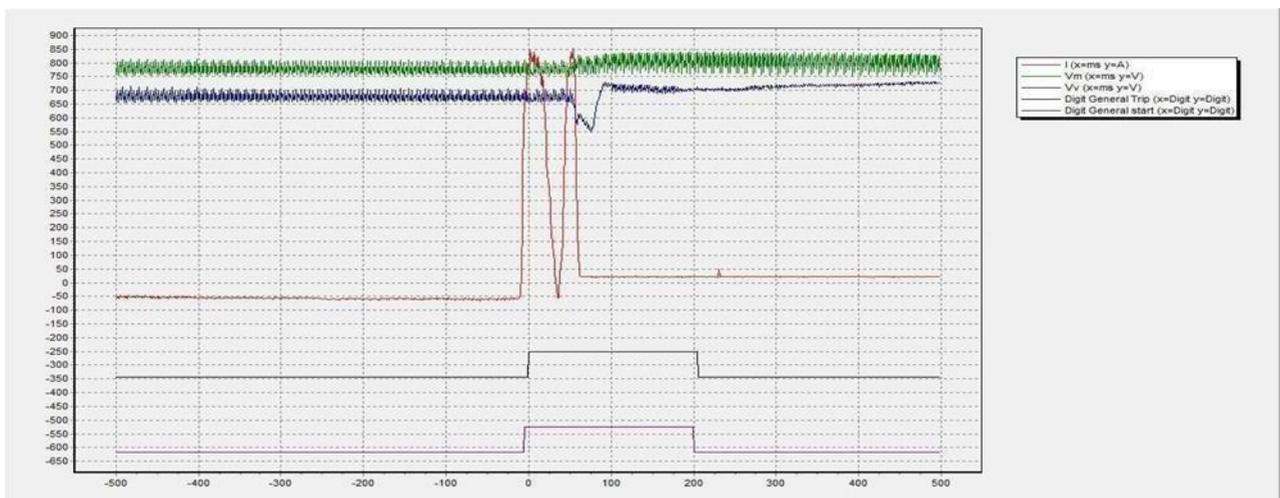


Figure IV.17 : cas real de défaut pris par SETRAM.

8. L'analyse discriminante quadratique (QDA)

L'analyse discriminante quadratique (QDA) est une méthode de classification qui suppose que les observations de chaque classe sont normalement distribuées, mais avec des matrices de covariance différentes. Il s'agit d'une extension de l'analyse discriminante linéaire (LDA), qui suppose que les classes ont la même matrice de covariance. La QDA peut s'adapter à des limites de décision plus complexes que la LDA, mais elle peut également être plus sujette au surajustement. [30]

Tableau IV.7 : Apprentant en classification par les données de SETRAM (Classification Learner).

Modèle	Précision	Temps d'apprentissage
QDA	99,1%	13,456 s

9. Résultats de classification

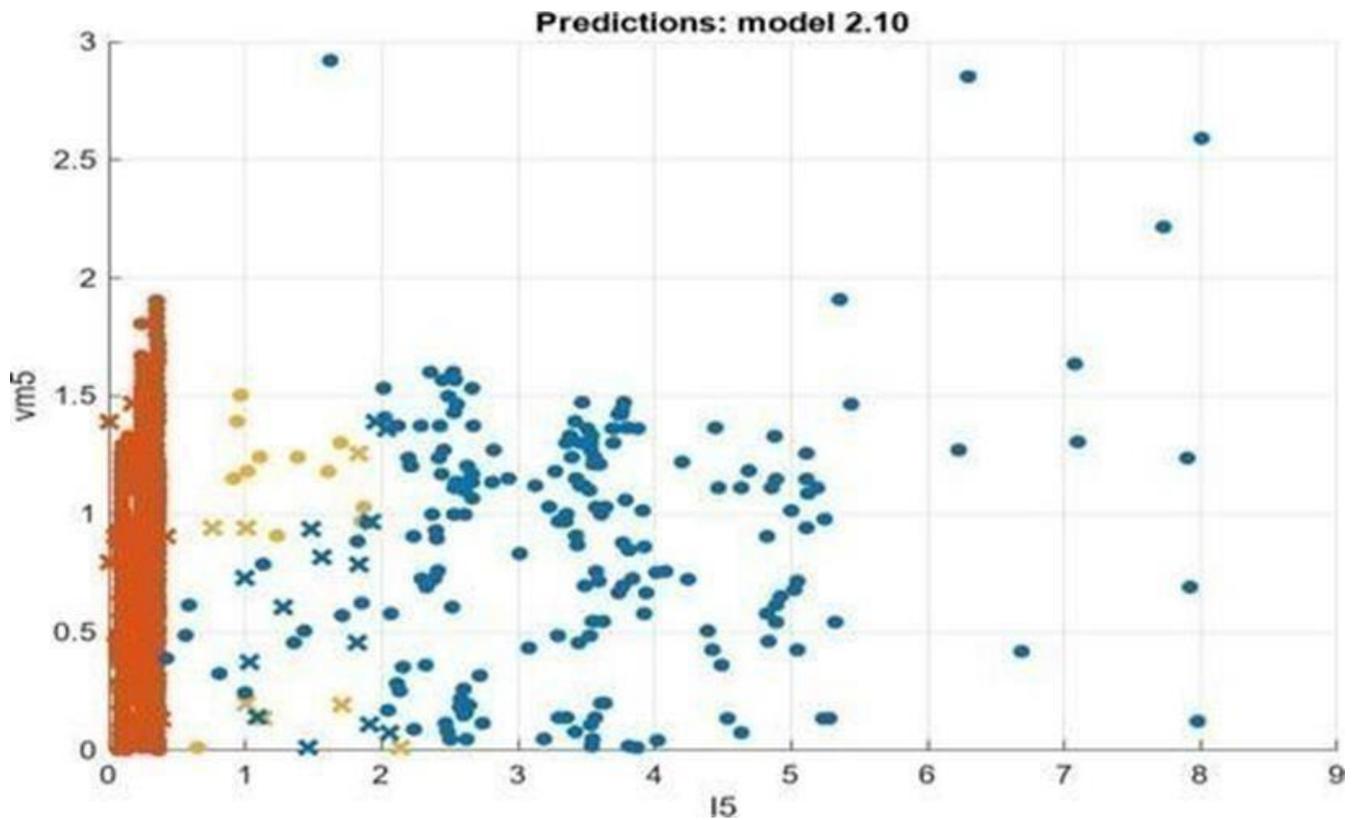


Figure IV.18 : SCATTER (donnés de SETRAM)

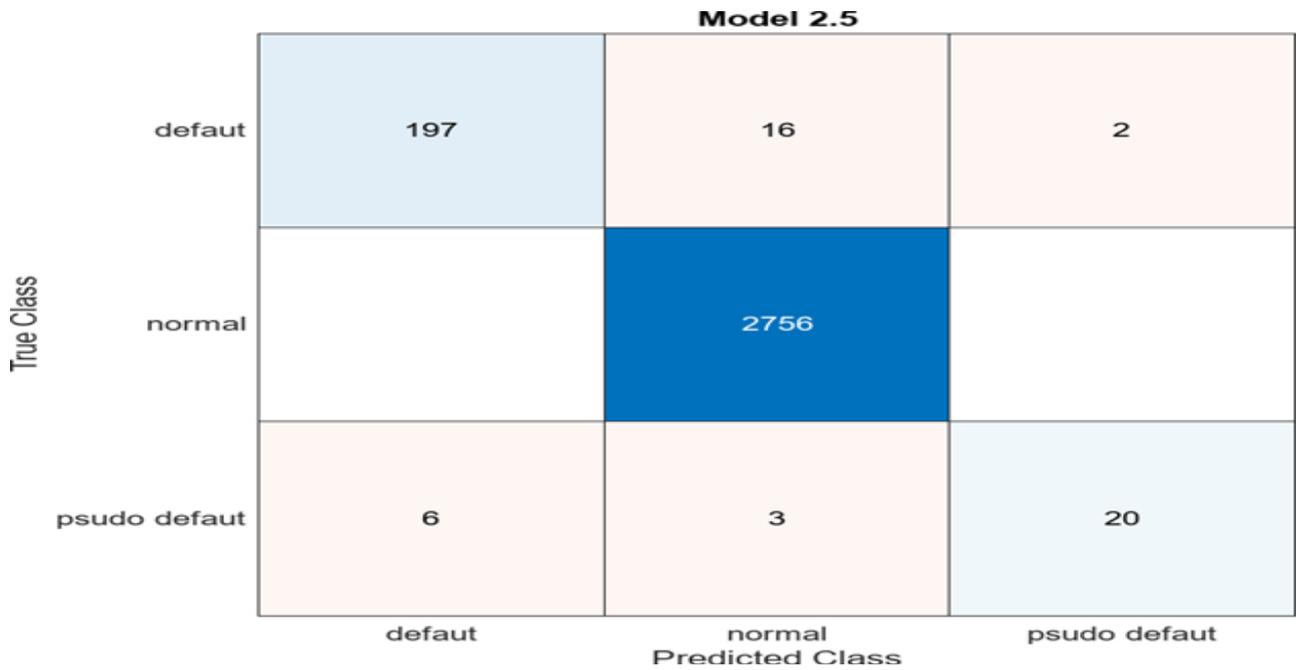


Figure IV.19: Matrice de confusion (donnés de SETRAM)

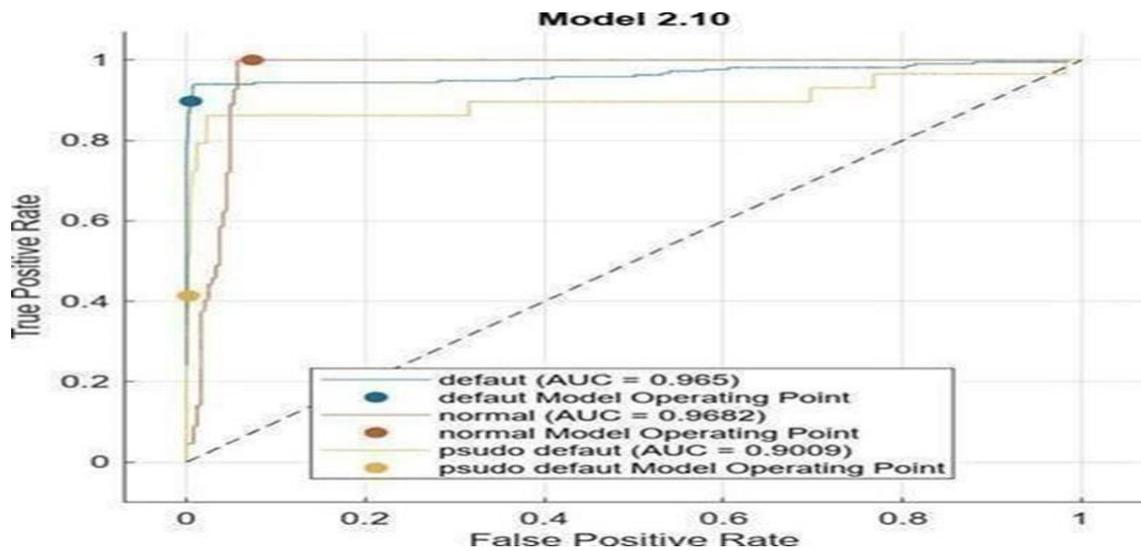


Figure IV.20 : ROC courbe réel

10. Résultats de comparaison final :

La simulation effectuée nous a permis de trouver un rapprochement entre la méthode que nous avons appris de la société SETRAM et notre technique d'IA pour détecter les pannes électriques.

11. Conclusion :

D'après la simulation réalisée, nous avons conclu une correspondance entre la méthode apprise de la société SETRAM et notre méthode basée sur la technique de l'intelligence artificielle pour détecter les défauts électriques.

L'utilisation de l'intelligence artificielle pour la détection des défauts électriques dans les tramways se révèle prometteuse.

Les résultats obtenus démontrent une amélioration substantielle par rapport aux méthodes traditionnelles, en offrant des diagnostics plus précis et en temps réel. Pour maximiser les bénéfices de cette technologie, il est recommandé de continuer à enrichir les bases de données avec des informations de qualité, de perfectionner les algorithmes utilisés et de mener des essais à grande échelle dans des environnements réels.

Les futures recherches pourraient également explorer l'intégration de techniques de maintenance prédictive avancées et l'application de l'IA à d'autres aspects de la gestion des systèmes de transport urbain.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Malgré les défis rencontrés lors de sa mise en œuvre, tels que les coûts élevés et les perturbations temporaires, le tramway représente un investissement judicieux pour l'avenir de la ville. En favorisant le développement urbain durable et en répondant aux besoins croissants en mobilité, le tramway s'inscrit dans une démarche globale visant à améliorer la qualité de vie des citoyens et à promouvoir un environnement urbain plus harmonieux.

Ainsi, ce travail de recherche souligne l'importance du tramway comme un élément essentiel de la politique de transport urbain de Mostaganem, appelant à une gestion efficace et à une planification stratégique continue pour garantir son succès à long terme.

Après les efforts déployés et les recherches continues, nous avons obtenu certains résultats souhaités en réduisant la période de détection de défaut électrique dans le réseau du tramway en nous appuyant sur la technologie de l'intelligence artificielle, qui est devenue le sujet de conversation du monde. Nous avons exploité cette technologie dans le côté blanc de la science pour la facilitation et le développement.

Nous avons conclu que l'intelligence artificielle joue désormais un rôle majeur dans tous les secteurs, en particulier la technologie électrique qui nous aide à détecter précocement les défauts qui pourraient entraîner l'arrêt d'exploitation ou les pertes de machines.

Référence :

- [1] Jean-Pierre Orfeuil Éditions Technip 2012
- [2] Olympia Devoe – Crescent Vallée 34400 LUNEL 34400 LUNEL Paris Archaimbau D’Avis
- [3] GHILANI Abdelmoumen TIDJANI Islam mémoire de tramway du Ouargla 2021-06-25
- [4] Adrien BERNARD Techno-science.net 05/02/2024.
- [5] <https://www.sonelgaz.dz>
- [6] Dr merahi amir Cours UEF –ELTF 214 intitulé 2018/2019
- [7] Formation SETRAM 2023/2024
- [8] DJEBAIRIA Sabra HOUAMRIA Radja mémoire fin d’étude 2020/2021
- [9] NF EN 50122-2. (Août 2011). Applications ferroviaires - Installations fixes - Sécurité électrique, mise à la terre et circuit de retour - Partie 2 : mesures de protection contre les effets des courants vagabonds issus de la traction électrique à courant continu.
- [10] Chen, Z., Koleva, D., & van Breugel, K. A review on stray current- induced steel corrosion in infrastructure (2017).
- [11] Al-Amleh, M., Abuznaid, N., Dababseh, W. (Year). Design of DC Tramway Traction Power Network in Hebron.
- [12] Pons, Enrico. Electrical Safety of DC Urban Rail Engineering 7-10 June 2016.
- [13] IEEE Dipartimento Energia -Politecnico di Torino Torino, 10129, ITALY Chp3
- [14] Locating Ground-Faults for a Safer Rail System. (2020, December 14).
- [15] <https://www.bender.de/en/solutions>
- [34] Distributeur de matériel électrique & pneumatique industriel. (2020, Novembre 29)
- [16] Hamadache, Moussa, Saikat Dutta, Osama Olaby, Ramakrishnan Ambur, Edward Stewart, and Roger Dixon. —On the Fault Detection and Diagnosis of Railway Switch and Crossing Systems: An Overview.∥ Applied sciences, November27, 2019.
- [17] Viper Innovations 2024. Enregistré en Angleterre sous lenuméro 6213408. SiteWeb par Squarebird.
- [18] ALSTOM SA 2024
- [19] Volume 2020 |Article ID 8849734 |Petr Dolezel Identification dutype de trainchez S&C
- [19] 2024 by Helios Electric LLC | Website by V

[20][21][22][23][25][26][28][29][30]: <https://fr.matworks.com>

[24] <https://fcmicro.net>

[27] <https://datscientest.com>

Annexe

- **Les caractéristiques principales de la rame :**

Type de rame	Citadis 402
Nombre des rames	25
Longueur de rame	44 m
Largeur de la rame	2,5 m
Hauteur maxi au-dessus du rail	3321mm
Hauteur du plancher au-dessus du rail	350 mm
Distance entre pivots des bogies	11 142 mm
Empattement des bogies	1 600 mm
Masse à vide en ordre de marche	54,92 t
Masse en charge normale	75,92 t
Nombre de bogies moteur	3
Nombre de bogies porteur	1
Nombre de places assises	71
Charge normale (norme de 4 passagers par mètre-carré)	287 passagers
Charge maximale (norme de 6 passagers par mètre-carré)	395 passagers
Vitesse maximale	70 km/h
Puissance maximale à la jante (traction)	880 kW
Tension d'alimentation	750 V Courant Continue
Accélération moyenne en charge normale en palier	1,15 ms. ⁻² de 0 à 40 km/h
Rayon de courbure minimal	25 m

▪ **Les niveaux de maintenances :**

❖ 1er Niveau

Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles

❖ 2ème Niveau

Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive, telles que graissage ou contrôle de bon fonctionnement. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne.

❖ 3ème Niveau

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réalignement des appareils de mesure. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance

❖ 4ème Niveau

Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés. Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé doté d'un outillage général (moyens mécaniques, de câblage, de nettoyage, etc.) et éventuellement des bancs de mesure et des étalons de travail nécessaires, à l'aide de toutes documentations générales ou particulières.

❖ 5ème Niveau

Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure. Par définition, ce type de travail est donc effectué par le constructeur, ou par le reconstruteur, avec des moyens définis par le constructeur et donc proches de la fabrication.

▪ Schéma général du système d'alimentation de traction :

