

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE PROTECTION INTELLIGENTE
CONTRE LES COURTS-CIRCUITS DANS LES TABLEAUX ÉLECTRIQUES
POUR SNEL SA GOMA

Par **AMANI MUTOKA Ghislain**

Mémoire de fin d'études présenté et défendu en vue
de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Civil en génie
électrique et informatique.

Option : Génie Électrique

**Directeur : Prof. Dr. Techn. Olivier BARAKA
MUSHAGE**

Encadreur : CT. Msc. Dieudonné MUSONGYA

ANNÉE ACADEMIQUE 2023-2024

ÉPIGRAPHE

"Les systèmes intelligents ne se contentent pas de répondre aux problèmes, ils les anticipent."

Ray Kurzweil

DÉDICACES

À nos parents, Désiré MUTOKA et Anastasie BAGANDA, je dédie ce travail à votre immense dévouement.

AMANI MUTOKA Ghislain

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé la santé, la sagesse et la persévérance tout au long de ce parcours académique. À Lui soient la gloire et l'honneur.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre directeur de mémoire, Prof. Dr. Techn. Olivier Baraka MUSHAGE, pour son accompagnement scientifique, ses conseils avisés et sa disponibilité. Votre rigueur et expertise ont grandement contribué à la réussite de ce travail. A notre encadreur Msc. Dieudonné MUSONGYA, pour son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Nous adressons notre reconnaissance aux autorités académiques et administratives de l'ULPGL/Goma, particulièrement à celles de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées (FSTA), pour leur dévouement et leur précieuse contribution à notre formation.

Nos sincères remerciements vont à nos parents, Désiré MUTOKA et Anastasie BAGANDA, pour leur amour, leur soutien moral et financier, ainsi que pour les nombreux sacrifices consentis pour notre éducation. Vous avez toujours cru en nous, et c'est grâce à vous que nous avons pu atteindre ce niveau.

Nous exprimons notre gratitude à toute la grande famille MUTOKA, nos sœurs, beaux-frères pour leur soutien moral, leurs encouragements et leurs prières constantes. Votre présence a été une source de force et de motivation tout au long de ce parcours.

Nous remercions également nos camarades particulièrement Ing. Gloire MUMBERE pour son aide précieuse et ses conseils pratiques, qui ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude à nos amis et à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont apporté leur soutien, actif ou passif. Que Dieu bénisse ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

AMANI MUTOKA Ghislain

RÉSUMÉ

Le court-circuit, véritable bête noire des installations électriques, n'est pas un simple dysfonctionnement anodin. Sa nature imprévisible et ses effets dévastateurs en font un danger réel pour la sécurité des biens et des personnes. En effet, lorsqu'une défaillance survient, le courant électrique se fraye un chemin inhabituel, créant une surintensité susceptible d'endommager gravement les équipements et, pire encore, de déclencher un incendie. Les systèmes de protection traditionnels, bien que présents, ne parviennent pas toujours à endiguer le fléau. Fonctionnant sur la base de seuils prédéfinis de courant et de tension, ils peuvent se montrer inefficaces face à certains types de courts-circuits, laissant ainsi le temps aux dommages de se propager. De plus, ces systèmes génèrent parfois des interventions intempestives, perturbant inutilement la distribution électrique et occasionnant des désagréments aux utilisateurs. Face aux limites des solutions classiques, l'intelligence artificielle se présente comme une voie prometteuse pour contrer les courts-circuits et minimiser leurs impacts néfastes. Notre projet s'inscrit dans cette dynamique en proposant un système de protection innovant exploitant la puissance de l'intelligence artificielle pour détecter et réagir aux anomalies électriques de manière plus précise et réactive. En s'affranchissant des seuils rigides et en s'adaptant en permanence aux caractéristiques du réseau électrique, notre système intelligent offre une protection optimale contre les courts-circuits. Sa capacité à analyser en temps réel les données électriques et à identifier les signatures caractéristiques d'un court-circuit lui permet d'intervenir en urgence, limitant ainsi la propagation des dommages et réduisant considérablement les risques d'incendie.

Mots clés : Système, protection intelligente, courts-circuits, tableaux électriques, réseaux électriques.

ABSTRACT

Short circuits, the real black beast of electrical installations, are not just simple and harmless malfunctions. Their unpredictable nature and devastating effects make them a real danger to the safety of property and people. Indeed, when a failure occurs, the electric current finds an unusual path, creating an overcurrent that can seriously damage equipment and, even worse, start a fire. Traditional protection systems, although present, are not always able to contain the scourge. Operating on the basis of predefined current and voltage thresholds, they can be ineffective against certain types of short circuits, thus allowing time for damage to spread. In addition, these systems sometimes generate untimely interventions, unnecessarily disrupting the electrical distribution and causing inconvenience to users. Faced with the limitations of classical solutions, artificial intelligence presents itself as a promising way to counter short circuits and minimize their harmful impacts. Our project is part of this dynamic by proposing an innovative protection system that uses the power of artificial intelligence to detect and react to electrical anomalies in a more precise and reactive way. By breaking free from rigid thresholds and constantly adapting to the characteristics of the electrical network, our intelligent system offers optimal protection against short circuits. Its ability to analyze electrical data in real time and identify the characteristic signatures of a short circuit allows it to intervene in an emergency, thus limiting the spread of damage and considerably reducing the risk of fire.

Keywords: System, smart protection, short circuits, electrical panel, electrical networks

TABLE DES MATIÈRES

ÉPIGRAPHE	1
DÉDICACES	2
REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ.....	4
ABSTRACT	5
TABLE DES MATIÈRES	6
LISTE DES ABRÉVIATIONS	9
LISTE DES TABLEAUX	11
LISTE DES FIGURES	12
0. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13
0.1. PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE	13
0.2. HYPOTHÈSE.....	14
0.3. CHOIX ET INTÉRÊT DU SUJET	15
0.4. OBJECTIFS DU TRAVAIL	16
0.4.1. L'objectif général	16
0.4.2. Les objectifs spécifiques	16
0.5. MÉTHODOLOGIE ET TECHNIQUES UTILISÉES	17
0.6. SUBDIVISION DU TRAVAIL	18
Chapitre 1 : QUELQUES GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ELECTRIQUES.....	1
1.1 INTRODUCTION.....	1
1.2 PRESENTATION DU POSTE DE TRANSFORMATION HT/MT DE LA SNEL/GOMA.....	1
1.3 LES RESEAUX ELECTRIQUES	6
1.3.1 Les niveaux de tensions des réseaux	6
1.3.2 Description des réseaux électriques	7
1.4 TABLEAU ÉLECTRIQUE DE MOYENNE TENSION	9
1.4.1 Compartiment jeu de barres	11

1.4.2	Compartiment appareillage	12
1.4.3	Compartiment tête de câbles	13
1.5	CONCLUSION PARTIELLE	22
Chapitre 2 SYSTÈMES DE PROTECTION ET RÉSEAUX NEURONAUX POUR LA		
DÉTECTION DES DÉFAUTS ÉLECTRIQUES		23
2.1	INTRODUCTION	23
2.1.1	Les concepts fondamentaux dans les systèmes de protection des réseaux électriques.....	23
2.2	QUALITE ET PERFORMANCES	23
2.2.1	Organisation	24
2.3	LES DEFAUTS DANS LES RÉSEAUX ELECTRIQUES	24
2.3.1	Types de défauts	25
2.3.2	Détection de défaut.....	27
2.3.3	Classification des défauts	Erreur ! Signet non défini.
2.3.4	Localisation des défauts	28
2.3.5	Apprentissage d'un réseau de neurone :	29
2.3.6	Les avantages et les inconvénients de RNA.....	31
2.4	APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE DANS LA PROTECTION ET LE CONTROLE DES SYSTEMES ELECTRIQUES.....	32
2.4.1	Définition de l'intelligence artificielle	32
2.4.2	Intégration de l'IA et de l'apprentissage automatique dans la gestion des systèmes électriques	33
2.4.3	Processus d'apprentissage du réseau neuronal utilisé pour la détection d'arc secondaire.....	Erreur ! Signet non défini.
2.4.4	Limitations des technologies de protection et de contrôle existantes	34
2.4.5	Les opportunités d'IA dans le domaine de la protection et de la réparation (P&C)	36
2.4.6	Domaines spécifiques d'application de l'IA/AA en protection et contrôle.....	41
2.4.7	Protection des actifs	41
2.4.8	Protection du réseau	42
2.4.9	Analyse post-événement	43
2.4.10	Résumé des domaines potentiels de P&C pour l'application de l'IA/ML	44

2.4.11	L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la protection numérique ou numérique des relais pour la révolution de l'industrie de l'énergie électrique.	45
2.4.12	Détection des défauts améliorée par l'IA.....	46
2.4.13	Processus de prise de décision.....	47
2.4.14	Stratégies de maintenance prédictive	47
2.4.15	Considérations techniques et mise en œuvre.....	48
2.5	CONCLUSION PARTIELLE.....	48
Chapitre 3 : DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME DE PROTECTION INTELLIGENTE CONTRE LES COURTS-CIRCUITS		50
3.1	INTRODUCTION.....	50
3.2	PRÉSENTATION DU FEEDER CENTRE.....	50
3.3	RECOLTE DES DONNEES.....	53
3.4	ENTRAÎNEMENT DU MODELE	55
3.4.1	Méthode de bagging utilisant des arbres de décision	56
3.5	PRESENTATION DES RESULTATS	57
3.6	CONCLUSION PARTIELLE.....	65
CONCLUSION GENERALE		65
Annexe A.....		69
A.1	Schéma électrique unifilaire du réseau MT de la ville Gom.....	70
Annexe B Algorithmes de protection.....		71
B.1	Prédiction du type de défaut et du numéro du jeu de barre en défaut	71
B.2	Fonction des données de chaque branche	72
B.3	Code MATLAB pour transformée les fichier MATLAB en fichier excel.....	73
B.4	Code de preprocessing python pour combiner les différents les fichier excel en un seul fichier excel	74
B.5	Code de preprocessing python pour combiner les différents les fichier excel pour un même type de défaut en un seul fichier excel	76
Bibliographie.....		79

LISTE DES ABRÉVIATIONS

❖ A	: Ampère
❖ AA	: Apprentissage automatique
❖ aD	: Accompagnement disjoncteur
❖ aM	: Accompagnement moteur
❖ ANN	: Artificiel neural network
❖ BT	: Basse tension
❖ BTA	: Basse tension A
❖ BTB	: Basse tension B
❖ CA	: Courant alternatif
❖ CC	: Court-circuit
❖ CEI	: Commission électrotechnique internationale
❖ Disj	: Disjoncteur
❖ DL	: Deep Learning
❖ gG	: Fusible à usage général
❖ HT	: Haute tension
❖ HTA	: Haute tension A
❖ HTB	: Haute tension B
❖ I	: Courant
❖ IA	: Intelligence artificielle
❖ In	: Courant nominal
❖ IoT	: Internet des objets
❖ Jb	: Jeu de barre
❖ kA	: Kiloampère
❖ kV	: Kilovolt
❖ kVA	: Kilovolt ampère

❖ L	: Ligne
❖ ML	: Machine Learning
❖ MT	: Moyenne tension
❖ MW	: Mégawatt
❖ MVA	: Mégavolt ampère
❖ OCR	: Reconnaissance optique de caractères
❖ P&C	: Protection & réparation
❖ Pdc	: Pouvoir de coupure
❖ RAS	: Schéma d'action corrective
❖ RDC	: République Démocratique du Congo
❖ RL	: Reinforcement learning
❖ RNA	: Réseau de neurone artificiel
❖ SIPS	: Système de protection de l'intégrité du système
❖ SNEL	: Société nationale d'électricité
❖ SVM	: Support vector machine
❖ SysML	: System modeling Language
❖ T	: Terre
❖ TA	: Transformateur abaisseur
❖ TBT	: Très basse tension
❖ TE	: Transformateur élévateur
❖ Un	: Tension nominale
❖ UR	: Ultra rapide
❖ V	: Volt
❖ WAMPAC	: Protection et contrôle à grande échelle

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Caractéristiques des jeux de barres du poste HT	4
Tableau 1-2 : Caractéristiques des disjoncteurs du postes HT	5
Tableau 1-3 : Section et nature des conducteurs des feeders	5
Tableau 1-4 : Gamme de tension utilisée en RDC.	7
Tableau 1-5 : Type d'interrupteur sectionneur	13
Tableau 2-1 : Domaines potentiels d'application de l'IA/ML	44
Tableau 3-1 : Illustration des données du feeder Centre	52
Tableau 3-2 : Types de défauts électriques et leurs codes	55
Tableau 3-3 : Illustration des résultats pour l'évaluation de la précision des modèles en temps réel	60
Tableau 3-4 : Résultats modèle prédiction jeu de barre en défaut	62
Tableau 3-5 Résultats modèle prédiction jeu de barre en défaut	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma unifilaire du poste HT/MT de la SNEL/Goma.....	3
Figure 1.2 : Modèle d'un réseau électrique.....	9
Figure 1.3 : Compartiments d'un tableau électrique MT.....	11
Figure 1.4 : Sectionneur de terre	16
Figure 1.5 : Disjoncteur MT	21
Figure 2.1 : Processus d'apprentissage du réseau neuronal utilisé pour la détection d'arc	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.2 : Cadre d'apprentissage coordonné basé sur l'apprentissage automatique hors ligne/en ligne	40
Figure 2.3 : Système de surveillance de la stabilité de la tension en temps réel (VSM) proposé	43
Figure 3.1 : Réseau de distribution de SNEL/Goma	51
Figure 3.2 : Schéma Unifilaire du feeder Centre	52
Figure 3.3 : Modèle implémenté pour le feeder centre.	59
Figure 3.4 : Illustration de la matrice de confusion du modèle pour la prédiction du jeu de barre en défaut	61
Figure 3.5 : Illustration de la rapidité de la détection du modèle.....	63
Figure 3.6 : Illustration de la matrice de confusion du modèle de prédiction du type de défaut	64

0. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Avec le développement économique de notre pays, le nombre d'équipements électriques et d'appareils électroménagers ne cesse d'augmenter. L'utilisation de l'énergie électrique est pratique et s'accompagne également de dangers cachés [1]. Le vieillissement ou la conception défectueuse des équipements électriques sont souvent à l'origine d'incendies d'origine électrique. Il est donc primordial de concevoir des disjoncteurs capables de prévenir de tels sinistres [2].

L'utilisation croissante de l'énergie électrique dans notre société moderne apporte de nombreux avantages, mais elle comporte également des risques. Parmi ces risques, les courts-circuits figurent parmi les plus dangereux [3].

Les courts-circuits sont des événements où le courant électrique suit un chemin de faible résistance, contournant ainsi les dispositifs de protection. Ils peuvent entraîner des surchauffes, des incendies et des dommages matériels. Pour prévenir ces situations, les disjoncteurs et les fusibles sont des exemples de protection essentielles [3]. Ils détectent les surintensités et interrompent le courant électrique en cas de court-circuit. Les disjoncteurs modernes sont plus rapides et plus précis, offrant une meilleure sécurité.

En somme, la protection électrique est essentielle pour prévenir les courts-circuits et garantir la sécurité des personnes et des biens. Il est crucial de concevoir des disjoncteurs plus intelligents et plus automatisés pour répondre aux besoins croissants de notre société en matière d'électricité.

0.1. PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Le réseau électrique de Goma, particulièrement celui de la SNEL est confronté à de nombreux défis, notamment sa vétusté, son manque d'entretien et sa faible capacité. Cela le rend vulnérable aux incidents électriques, dont les courts-circuits [4].

Les courts-circuits, qui peuvent être provoqués par divers facteurs (défauts d'isolation, surcharges, etc.), constituent l'une des principales causes de pannes et d'incendies électriques. Ils peuvent causer des dommages matériels importants, des blessures graves, voire des décès.

Les systèmes de protection traditionnels contre les courts-circuits, tels que les disjoncteurs et les fusibles, sont moins efficaces, lents et imprécis. Ils peuvent également déclencher des interventions intempestives, perturbant la fourniture d'électricité.

Les disjoncteurs différentiels traditionnels et d'autres équipements de protections utilisés à nos jours sont limités dans le sens où ils ne peuvent pas s'adapter aux conditions du réseau tels que les variations de charge et les fluctuations du réseau et ajuster leurs seuils de déclenchement en temps réel. Ces disjoncteurs manquent d'intelligence et n'utilisent pas des algorithmes sophistiqués pour analyser les courants et les tensions afin de distinguer les courts-circuits des autres défauts, minimisant ainsi les déclenchements inutiles [5] [6] [7].

Pour proposer une réponse au problème susmentionné, les questions suivantes vont guider notre recherche :

1. Quels sont les principaux défis liés à la protection contre les courts-circuits dans les tableaux électriques des réseaux électriques actuels ?
2. Quelles sont les technologies et les méthodes existantes pour détecter et prévenir les courts-circuits dans les tableaux électriques ?
3. Comment peut-on développer un système de protection intelligent qui utilise des algorithmes avancés pour détecter et réagir rapidement aux courts-circuits, tout en minimisant les risques de dommages aux équipements électriques et en assurant la sécurité des personnes ?

0.2. HYPOTHÈSE

En considérant les questions de recherche posées, nous pouvons formuler quelques hypothèses qui pourraient guider notre exploration du développement d'un système de protection intelligent contre les courts-circuits dans les tableaux électriques. Voici donc quelques hypothèses anticipatives à prendre en compte :

1. Les principaux défis liés à la protection contre les courts-circuits dans les tableaux électriques des réseaux électriques actuels seraient la détection rapide et précise des courts-circuits, la coordination des dispositifs de protection, la gestion de la charge électrique et la minimisation des interruptions de service.
2. Les technologies et méthodes existantes pour détecter et prévenir les courts-circuits dans les tableaux électriques comprenaient l'utilisation de relais de protection, de fusibles, de

disjoncteurs, de dispositifs de surveillance en temps réel et de systèmes de détection de courant anormal.

3. Pour développer un système de protection intelligent contre les courts-circuits, il serait nécessaire d'utiliser des algorithmes avancés tels que l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique, la coordination des dispositifs de protection et l'optimisation de la gestion de la charge électrique. De plus, l'utilisation de capteurs intelligents et de technologies de communication avancées pourrait permettre une réaction rapide et une coordination efficace entre les différents composants du réseau électrique.

0.3. CHOIX ET INTÉRÊT DU SUJET

Notre étude porte sur le développement d'un système de protection intelligente contre les courts-circuits dans les tableaux électriques pour les réseaux électriques de la SNEL SA dans la ville de Goma parce qu'elle présenterait plusieurs avantages entre autres :

A. Amélioration de la sécurité :

- Réduction du nombre d'incendies d'origine électrique, protégeant ainsi les vies humaines et les biens matériels.
- Diminution des risques d'électrocution, contribuant à un environnement plus sûr pour la population.

B. Fiabilisation du réseau électrique :

- Réduction des interruptions de service causées par les courts-circuits et l'améliorant la qualité de l'électricité fournie.
- Diminution des coûts de maintenance et de réparation du réseau électrique.

C. Avantages spécifiques pour la population de Goma :

- Amélioration de la qualité de vie grâce à un environnement plus sûr et une meilleure alimentation électrique.

En résumé, le développement d'un système de protection intelligente contre les courts-circuits à Goma apporterait des avantages significatifs à la population en termes de sécurité, de fiabilité du réseau électrique, de développement économique et de durabilité.

0.4. OBJECTIFS DU TRAVAIL

0.4.1. L'objectif général

L'objectif général de ce travail est de concevoir un système de protection intelligente contre les courts-circuits dans les tableaux électriques de la SNEL SA dans la ville de Goma. Ce système devrait être capable de détecter rapidement et précisément les courts-circuits, de coordonner les dispositifs de protection, de gérer efficacement la charge électrique et de minimiser les interruptions de service. L'objectif est d'améliorer la sécurité des installations électriques, réduire les risques de dommages aux équipements et d'assurer la continuité de l'alimentation électrique.

0.4.2. Les objectifs spécifiques

Afin d'atteindre cet objectif général, nous pouvons définir les objectifs spécifiques suivants :

- Étudier les principes des courts-circuits, les généralités sur les réseaux électriques et les méthodes conventionnelles de protection utilisées dans les tableaux électriques.
- Concevoir un modèle de système de protection basé sur l'intelligence artificielle, en intégrant des capteurs de courant et de tension pour surveiller en temps réel les signaux électriques.
- Développer des algorithmes d'apprentissage automatique capables de reconnaître les schémas caractéristiques des courts-circuits et de prendre des décisions de déconnexion rapide.
- Simuler le système proposé dans un environnement virtuel, en utilisant des données de courts-circuits réelles ou générées, pour évaluer ses performances en termes de précision de détection et de temps de réaction.
- Comparer les performances du système de protection basé sur l'intelligence artificielle avec les méthodes conventionnelles de protection dans différentes situations de court-circuit et en présence de variations de charge.

0.5. MÉTHODOLOGIE ET TECHNIQUES UTILISÉES

Afin de bien mener notre étude, bien de méthodes et techniques des recherches scientifiques ont été utilisées :

A. MÉTHODES

- **La méthode analytique** : est une approche de résolution de problèmes et d'apprentissage qui repose sur la décomposition d'un sujet complexe en ses éléments constitutifs. L'objectif est de comprendre le fonctionnement global du système en analysant ses parties individuelles et leurs interactions. Il nous aide à définir le problème, collecter des informations, décomposer, analyser, synthétiser, tirer des conclusions.
- **Méthode descriptive** : Cette méthode nous permet de décrire dans le bref détail le système de protection intelligente contre les courts-circuits dans les tableaux électriques ainsi que son mode de fonctionnement.
- **SysML (Systems Modeling Language)** est un langage de modélisation graphique utilisé pour l'ingénierie système. Il permet de représenter de manière visuelle et précise les différents aspects d'un système complexe, à travers divers types de diagrammes

B. TECHNIQUES

- **La technique expérimentale** : est une approche de recherche basée sur la réalisation d'expériences pour observer et analyser un phénomène. Elle implique de définir une question de recherche et des hypothèses à tester, Concevoir une expérience contrôlée pour tester les hypothèses, Collecter des données pendant l'expérience, analyser les données et tirer des conclusions
- **Technique documentaire** : La technique documentaire est une approche de recherche basée sur l'analyse de documents existants pour collecter des informations sur un sujet. Elle implique d'identifier les sources d'information pertinentes (livres, articles, archives...), collecter les informations et les données des sources identifiées, analyser les informations et les données collectées, synthétiser les résultats de l'analyse et tirer des conclusions.

0.6. SUBDIVISION DU TRAVAIL

Excepté l'introduction et la conclusion, notre travail porte sur les chapitres ci-après :

1. CHAPITRE 1 : Quelques généralités sur les réseaux électriques

Ce chapitre présente quelques informations générales utiles au développement de ce travail.

2. CHAPITRE 2 : Systèmes de protection et réseaux neuronaux pour la détection des défauts électriques

Ce chapitre présente l'état des recherches dans le domaine de détection des défauts, donne une revue sur les différents types de défauts, les différentes méthodes utilisées pour les détecter et les localiser. Ensuite, il introduit les notions de base sur les réseaux de neurones artificiels.

3. CHAPITRE 3 : Développement du système de protection intelligente contre les courts-circuits

Ce chapitre se concentre sur la création et l'implémentation d'algorithmes destinés à protéger un système intelligent contre les courts-circuits dans les tableaux électriques des réseaux électriques. Il inclut une discussion sur les défis rencontrés et les solutions apportées pour assurer la sécurité et la fiabilité du système.

Chapitre 1 : QUELQUES GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ELECTRIQUES

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre se concentre sur l'étude des courts-circuits électriques, un phénomène critique dans le domaine de l'ingénierie électrique. Nous commencerons par une présentation du poste de transformation de la SNEL/Goma, qui sera suivi d'une introduction aux concepts fondamentaux des réseaux électriques et leurs descriptions. Ensuite, parlerons des courts-circuits, nous examinerons leurs causes potentielles et les conséquences qu'ils peuvent avoir sur les systèmes électriques. Cette section vise à fournir une base solide pour comprendre pourquoi et comment les courts-circuits se produisent, ainsi que les défis qu'ils posent.

Dans la suite de ce chapitre, nous passerons en revue la littérature existante sur les courts-circuits, en mettant en lumière les recherches et les avancées technologiques récentes. Nous analyserons les méthodes de détection et de prévention des courts-circuits, ainsi que les dispositifs de protection utilisés pour minimiser les risques.

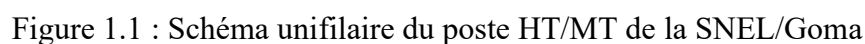
1.2 PRESENTATION DU POSTE DE TRANSFORMATION HT/MT DE LA SNEL/GOMA [8]

Le poste de transformation de la SNEL/Goma fut construit dans les années 1982-1983 ; alimenté par le réseau de transport HT à 70kV venant de la centrale hydroélectrique de Ruzizi (I et II), il permet de desservir en électricité une partie non négligeable de la ville de Goma via un réseau de distribution à 15kV et 6,6kV. Le poste de transformation comprend :

- Une salle de commande : où sont placés les équipements de commande à distance des disjoncteurs, des sectionneurs côté HT (70kV), des régulateurs de tension côté HT et des appareils de mesure (voltmètres, ampèremètres, fréquencemètre, compteurs électroniques d'énergie active et réactive).

- Une salle de dispatching : où sont placés les équipements moyenne tension (15KV et 6,6KV) tel que les disjoncteurs MT et les jeux de barres 15kV et 6,6kV.
- Une salle des batteries : Cette salle est équipée des batteries assurant les services auxiliaires du poste (communication avec la centrale de Ruzizi, éclairage, ...) et l'enclenchement des disjoncteurs côté HT à partir de leurs moteurs de commande.

La figure 1.1 illustre le schéma du poste de transformation.



On note sur la figure 1.1 que les éléments principaux constituant le poste sont :

A. Les transformateurs

Le poste HT/MT a deux transformateurs de puissance à faible volume d'huile ayant chacun les caractéristiques suivantes :

- Couplage : Yd (étoile triangle)
- Puissance apparente S_n : 10MVA
- Rapport de tension U_1/U_2 : 110kV, 70kV/15kV
- Courant nominal I_n : 385A (15kV)
- Tension de court-circuit U_{cc} : 10,6 kV

Les auxiliaires du poste sont alimentés par deux transformateurs, chacun directement branchés sur un de deux premiers transformateurs de puissance. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Couplage : ZNyn11 (Zigzag étoile avec neutre connectée de deux cotée indice horaire 11)
- Puissance apparente S_n : 160kVA
- Rapport de tension U_1/U_2 : 15/0.4kV

B. Jeu de barres

Selon le matériau, les dimensions et le niveau de tension, trois types de jeux de barre sont présents au poste. Le tableau 1.1 en donne un aperçu.

Tableau 1-1 : Caractéristiques des jeux de barres du poste HT

Désignation	Dimension	Matériaux
Jeu de barres 70kV	150mm ² (câble)	Aluminium-Acier
Jeu de barres 15kV	4x40mm ² (méplat)	Cuivre
Jeu de barres 6,6kV	8x20mm ²	Cuivre

C. Disjoncteurs

Les disjoncteurs cotés HT sont commandés à partir de la salle de commande. Les caractéristiques des différents disjoncteurs sont reprises dans le tableau 1.2.

Tableau 1-2 : Caractéristiques des disjoncteurs du postes HT

Désignation	Système d'extinction d'arc	Tension Nominale Un	Courant nominal In	Pouvoir de Coupure
Disj. Jeu de barres 70kV	Bain d'huile	123kV	1250A	165kA
Disj. Transfo 1 et 2	Bain d'huile	145kV	3150A	10kA
Disj. De couplage barres 15kV	SF ₆	17,5kV	800A	-
Disj. Feeders	SF ₆	24kV	800A	-

A. Feeder (départ)

Ils sont au nombre de 7 dont 5 partent du jeu de barres 15kV et 2 du jeu de barre 6,6kV. La section et la nature de chaque ligne MT est repris dans le Tableau 1.3.

Tableau 1-3 : Section et nature des conducteurs des feeders

Désignation de la ligne	Section	Type de canalisation /composition câble	Tension nominale Un	Distance entre conducteur
Feeder Sud	50mm ²	Aérienne / Allu-Acier	15kV	600mm
Feeder Centre	50 mm ²	Aérienne / Allu-Acier	15kV	600mm
Feeder Nord	50 mm ²	Aérienne / Allu-Acier	15kV	600mm
Feeder Route Sake	70 mm ²	Aérienne / Allu-Acier	15kV	600mm
Feeder SOTRAKI	50 mm ²	Aérienne / Allu-Acier	6,6kV	600mm
Feeder Camps militaire	95 mm ²	Souterraine / Cuivre	6,6kV	-
Feeder MONUSCO	50 mm ²	Aérienne / Allu-Acier	15kV	600mm

1.3 LES RESEAUX ELECTRIQUES

Les systèmes d'alimentation électrique en courant alternatif sont constitués de systèmes de production triphasés, de réseaux de transport et de distribution, et des charges. Les réseaux alimentent de grandes charges industrielles triphasées à différentes tensions de distribution et de transmission, ainsi que des charges résidentielles et commerciales monophasées. Par conséquent, ces systèmes se composent d'un certain nombre d'unités de production, de lignes de transmission, de lignes de distribution et de sous-stations. Ces derniers fonctionnent ensemble pour former un système complet d'énergie électrique (Electrical Power System). [9]

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 « G » 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 sera ensuite transformée sous une haute tension (90 kV ; 150 kV ; 225 kV...) par des transformateurs élévateurs (TE) installés à la sortie des générateurs. La totalité de l'énergie produite ou le surplus disponible sera transporté par un ensemble de lignes électriques (L) sous une haute tension, plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres, jusqu'aux centres de consommation. Cette énergie sera de nouveau transformée par des transformateurs abaisseurs (TA), puis distribuée sous une moyenne tension (30kV, 10 kV...) pour la mettre à la disposition des usagers [10]

1.3.1 Les niveaux de tensions des réseaux

Les tensions normalisées selon la CEI (Commission électrotechnique internationale), la nouvelle norme CEI définit les niveaux de tension alternative comme suit :

Tableau 1-4 : Gamme de tension utilisée en France [11].

Domaines de Tension		Valeur de la tension Nominal (U_N en Volts)	
		Courant Alternatif	Courant Continu
Très Basse Tension (TBT)		$U_N \leq 50$	$U_N \leq 120$
Basse Tension BT	BT A	$50 < U_N \leq 500$	$120 < U_N \leq 750$
	BT B	$500 < U_N \leq 1\,000$	$750 < U_N \leq 1\,500$
Haute Tension HT	HT A	$1\,000 < U_N \leq 50\,000$	$1\,500 < U_N \leq 75\,000$
	HT B	$U_N > 50\,000$	$U_N > 75\,000$

En RDC, confère la loi N°14/011 la tension est la différence de potentiel permettant l'écoulement de l'électricité entre deux points d'un circuit électrique ayant comme unité de mesure le volt(V) et comme plages conventionnelles [12]:

- Très haute tension, THT, correspondant à la tension supérieure à 250.000 V soit 250 kV ;
- Haute tension, HT, correspondant à la tension supérieure à 36.000 V, soit 36 kV et inférieure à 250.000 V soit 250 kV ;
- Moyenne tension, MT, correspondant à la tension supérieure à 1 000 V soit 1 kV et inférieure à 36.000 V soit 36 kV ;
- Basse tension, BT, correspondant à la tension inférieure ou égale à 1000 V soit 1 kV ;

1.3.2 Description des réseaux électriques

1.3.2.1 Le réseau de transport HTB

Généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau HTB que sont en principe

branchées les centrales de grandes puissances (>300 MW). Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud A, B et C constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence [12].

1.3.2.2 Le réseau de répartition HTB

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont : Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution HTA, Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HTB. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire [12].

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux [9].

1.3.2.3 Le réseau de distribution HTA

Les lignes de distribution à moyenne tension (HTA) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir ; Ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements [13].

1.3.2.4 Le réseau de livraison BTB

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230 V (380/230 en RDC). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs). La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de

distribution HTA aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BTB. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique [13].

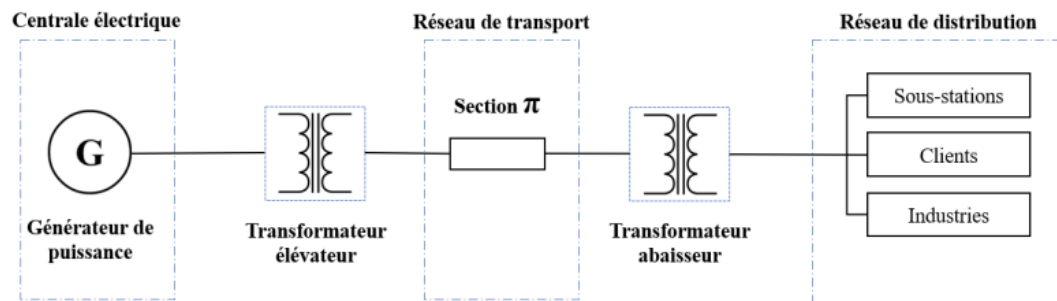


Figure 1.2 : Modèle d'un réseau électrique [13]

1.4 TABLEAU ÉLECTRIQUE DE MOYENNE TENSION

L'expression « tableau moyenne tension » se comprend comme un assemblage, de cellules DF-2 qui, couplées et reliées entre elles, constituent un poste de transformation ou de distribution conforme aux spécificités du client [14].

Le système DF-2 est un concept modulaire basé sur le principe des « blocs de construction », ce qui signifie que les cabines sont produites en série. Le concept modulaire DF-2 répond donc aux normes techniques les plus élevées de manière rationnelle et économiquement rationnelle. La combinaison des cabines est illimitée. Ce large éventail de possibilités permet d'établir des schémas très complexes et d'appareillages de distribution pour transformateurs [14].

Les cabines DF-2 peuvent être utilisées avec des appareillages de distribution et de dispersion, des sous-stations électriques et des moteurs à moyenne tension, des éoliennes, la cogénération, et bien plus encore [15].

En outre, il est conçu pour résister à des conditions extrêmes, maximiser la durée de vie de tableau de distribution et garantir la sécurité des opérateur [14].

La combinaison appropriée de ces modules (et leurs options possibles) permet d'assembler un tableau moyenne tension propre aux spécifications du client (avec une tension nominale de 12, 17,5 ou 24 kV) offrant ainsi une très grande sécurité à l'opérateur [14].

Les produits d'appareillage de moyenne tension (MT) sont les principaux équipements qui contrôlent le transfert de l'énergie électrique d'un point à un autre. Ils sont utilisés à des niveaux de tension allant jusqu'à 36 kV et jouent un rôle important dans la sécurité et la qualité de l'approvisionnement en énergie. Ces produits sont conçus en fonction des exigences électriques au point concerné du réseau (par exemple, la valeur et la direction de la puissance à transférer, le courant de court-circuit qui passera par ce point en cas de défaut éventuel dans le réseau) et comprennent des composants tels que des disjoncteurs, des sectionneurs, des transformateurs de courant et sont situés dans des postes de distribution ou des sous-stations ou dans des kiosques préfabriqués en béton et en tôle construits au point de transfert de l'énergie [16].

La modularité du concept DF-2 ne se limite pas à la possibilité de créer différentes configurations avec les cellules DF-2. Chaque cellule DF-2 est en soi un ensemble compartimenté qui détermine la fonction de la cellule [14].

Toutes les cellules DF-2 dotées d'une fonction de coupure comportent quatre compartiments distincts. La configuration de ces compartiments détermine la fonctionnalité de la cellule [14]. Sur la 1.3, les quatre compartiments qui constituent un tableau électrique MT sont montrés comme suit :

- Compartiment jeu de barres (D)
- Compartiment appareillage (C)
- Compartiment câbles (B)
- Compartiment commande et basse tension (A)

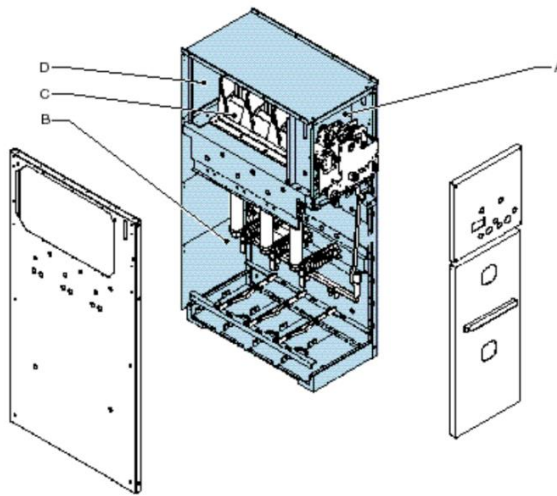


Figure 1.3 : Compartiments d'un tableau électrique MT [14]

1.4.1 Compartiment jeu de barres

Un compartiment jeu de barres électriques est une section d'un tableau électrique où sont installées les barres conductrices, généralement en cuivre ou en aluminium. Ces barres permettent de distribuer l'électricité de manière sécurisée et efficace à partir du disjoncteur principal vers les différents circuits du tableau. Elles assurent également la connexion entre les différents composants électriques du tableau [17].

Les jeux de barres peuvent être de différents types, comme les jeux de barres en peigne, les jeux de barres verticales et les jeux de barres modulaires. Chaque type a ses propres avantages et est choisi en fonction de la configuration de l'installation électrique [17].

Le compartiment jeu de barres se trouve derrière le compartiment commande mécanique et basse tension. Le jeu de barres permet de relier électriquement les différentes cellules du tableau moyenne tension. Le jeu de barres modulaire se compose de trois barres, de cuivre électrolytique titré 25 F, qu'il y aura lieu de monter lors de l'installation du tableau moyenne tension [14].

1.4.2 Compartiment appareillage

Le compartiment appareillage se trouve entre le compartiment jeu de barres et le compartiment câbles. En fonction du type de cellule, ce compartiment abritera un ou deux interrupteurs-sectionneurs [14].

1.4.2.1 Interrupteur-sectionneur

L'interrupteur-sectionneur RV 44 constitue la séparation physique entre le compartiment jeu de barres et le compartiment tête de câbles. L'interrupteur-sectionneur RV 44 est rempli de gaz SF6 (hexafluorure de soufre) et est scellé à vie. Les propriétés particulières du gaz SF6 assurent dans le compartiment la double fonction : d'isolation et d'anti déflagration. L'interrupteur-sectionneur est un interrupteur à 2 positions qui assure la liaison électrique entre les câbles haute tension et le jeu de barres. La position de l'interrupteur-sectionneur est clairement indiquée sur le schéma synoptique. En fonction du modèle, l'interrupteur-sectionneur sera actionné manuellement ou électriquement [14]. L'interrupteur sectionneur, aussi appelé « intersectionneur » ou interrupteur général [18]

La séparation avec un sectionneur s'effectue dans le tableau électrique, généralement. Il existe 2 types d'interrupteurs sectionneurs [18]: à coupure apparente et à coupure visible.

Tableau 1-5 : Type d'interrupteur sectionneur [18]

Type d'interrupteur sectionneur	Application
À coupure apparente	Il ressemble à un disjoncteur divisionnaire traditionnel et s'actionne de la même manière qu'un disjoncteur. On le rencontre fréquemment dans le tableau électrique en résidentiel ou dans le tertiaire
À coupure visible	Il est équipé d'une poignée ou d'un levier. Il s'utilise pour les intensités très fortes, c'est pourquoi on le retrouve dans les grosses armoires industrielles.

1.4.3 Compartiment tête de câbles

Le compartiment tête de câbles se trouve derrière la porte amovible et verrouillable de la cellule. Dépendant du modèle, ce compartiment abritera un ou plusieurs des éléments suivants [14]:

- Sectionneur de mise à la terre EM 20
- Combinaison fusible
- Disjoncteur
- Dispositifs pour la fixation du (des) câble(s) d'alimentation.

1.4.3.1 Sectionneur de mise à la terre

Le sectionneur de mise à la terre EM 20 se trouve sous l'interrupteur-sectionneur RV 44, et sur la paroi droite de la cellule. La fermeture : ouverture s'opère dans l'air (contrairement à l'interrupteur-sectionneur). Le sectionneur de mise à la terre est un interrupteur à 2 positions qui ouvert ou fermé, à coupure visible. Dépendant du modèle, le sectionneur de mise à la terre

sera actionné manuellement ou électriquement. Le sectionneur de terre est commandé par le même mécanisme de commande que l'interrupteur-sectionneur. Les deux sectionneurs sont mécaniquement verrouillés entre eux [14].

1.4.3.1.1 Fonctionnement d'un sectionneur de mise à la terre

Le sectionneur de terre fonctionne en fournissant un chemin à faible impédance qui dirige le courant de défaut vers le sous-sol pour protéger l'équipement électrique et la sécurité des personnes [19].

Voici une explication détaillée du principe de fonctionnement du sectionneur de terre:

1. Détection de défaut : lorsqu'un défaut de mise à la terre se produit dans le système électrique, comme un court-circuit entre la ligne et la terre, le sectionneur de mise à la terre doit détecter cet événement de défaut à temps.
2. Couper le circuit : une fois que le sectionneur de terre détecte le courant de défaut, il coupe rapidement le circuit défectueux. Cela peut être réalisé en déconnectant le disjoncteur.
3. Fonctionnement du sectionneur de terre : En même temps, le sectionneur de terre ferme le sectionneur de terre. Le sectionneur de terre est un dispositif spécial de coupure à couteau qui se connecte entre le point de défaut et la terre. Lorsque le sectionneur de terre est fermé, le courant de défaut peut être dirigé sous terre à travers lui.
4. Guidage du courant de défaut : Le but du sectionneur de terre est de diriger rapidement le courant de défaut sous terre pour former une boucle à faible impédance. Cela empêche le courant de traverser l'appareil ou le corps humain, réduisant ainsi les risques de sécurité. Grâce au chemin à faible impédance fourni par le sectionneur de terre, le courant de défaut peut rapidement traverser le point de défaut, créant ainsi un effet de court-circuit.
5. Protection de l'équipement et sécurité : le sectionneur de terre peut rapidement couper le circuit défectueux et diriger le courant défectueux vers le sous-sol, protégeant ainsi l'équipement électrique contre d'autres dommages. En même temps, il réduit le risque de choc électrique et d'arc électrique, protégeant ainsi le personnel contre les chocs électriques.

En résumé, le principe de fonctionnement du sectionneur de terre consiste à couper rapidement le circuit de défaut lorsqu'un défaut de mise à la terre se produit dans le système électrique et à guider le courant de défaut vers la terre pour former un circuit de court-circuit en fermant le sectionneur de terre afin de protéger l'équipement électrique et la sécurité des personnes. Le sectionneur de terre est un dispositif de sécurité important dans le système électrique, qui peut réagir rapidement aux défauts et fournir un guidage efficace du courant de défaut [19].

1.4.3.1.2 Utilisation d'un sectionneur de terre

1. Protection contre les défauts à la terre : le sectionneur de terre est principalement utilisé pour détecter et protéger les défauts à la terre dans le système électrique. En cas de court-circuit dans la terre d'un équipement ou d'une ligne électrique, le sectionneur de terre peut rapidement couper le courant de défaut et le diriger sous terre pour protéger la sécurité de l'équipement et du personnel.
2. Maintenance et révision : Afin d'assurer la sécurité lors des travaux de maintenance et de révision des équipements électriques, des sectionneurs de terre sont utilisés pour couper la connexion entre l'équipement électrique et l'alimentation électrique afin d'éviter tout risque de choc électrique.
3. Nouvelle construction : lors de la construction d'un nouveau système électrique, d'une sous-station ou d'une ligne, des sectionneurs de terre sont utilisés pour assurer des fonctions de sécurité et de mise à la terre sûres. Ils sont installés dans des endroits critiques pour garantir que les courants de défaut peuvent être rapidement coupés et dirigés sous terre en cas de défaut.
4. Détection et mesure : les sectionneurs de terre peuvent également être utilisés pour des travaux de détection et de mesure dans les systèmes électriques. Dans certains cas, les sectionneurs de terre peuvent être utilisés pour connecter ou déconnecter des instruments de mesure, des équipements de test de résistance de terre et d'autres appareils de test.

En conclusion, l'utilisation de sectionneurs de terre dans les systèmes électriques vise à protéger la sécurité des équipements électriques et du personnel, en assurant des fonctions de protection contre les défauts et de mise à la terre. Ils jouent un rôle important dans la protection contre les

défauts à la terre, la maintenance et la révision, les nouvelles constructions, ainsi que l'inspection et la mesure [19].



Figure 1.4 : Sectionneur de terre

1.4.3.2 Fusible

Les fusibles de moyenne tension jouent un rôle crucial dans la protection des réseaux électriques. Conçus pour fonctionner dans des systèmes de tension généralement compris entre 1 kV et 36 kV, ces fusibles assurent la sécurité et la fiabilité des équipements et des réseaux électriques. Leur principale fonction est de protéger contre les surintensités et les courts-circuits, minimisant ainsi les risques de dommages matériels et garantissant une distribution d'énergie stable [20].

Un fusible moyenne tension se compose généralement d'un élément fusible enfilé à l'intérieur d'un tube isolant. L'élément fusible est conçu pour fondre de manière contrôlée sous l'effet d'une surintensité. Cette action coupe le circuit et empêche la propagation de l'anomalie. Les matériaux utilisés dans la fabrication des éléments fusibles varient, mais ils doivent toujours présenter des caractéristiques de fusion précises et fiables [20].

1.4.3.2.1 Caractéristiques des Fusibles Moyenne Tension

Un fusible moyenne tension se compose généralement d'un élément fusible enfilé à l'intérieur d'un tube isolant. L'élément fusible est conçu pour fondre de manière contrôlée sous l'effet d'une surintensité. Cette action coupe le circuit et empêche la propagation de l'anomalie. Les

matériaux utilisés dans la fabrication des éléments fusibles varient, mais ils doivent toujours présenter des caractéristiques de fusion précises et fiables [20].

1.4.3.2.2 Types de Fusibles Moyenne Tension

Il existe plusieurs types de fusibles moyenne tension, chacun adapté à des applications spécifiques. Les plus courants sont [20]:

- **Fusibles à expulsion** : Utilisent un mécanisme d'extinction d'arc basé sur l'expulsion de gaz. Ils sont souvent utilisés dans les transformateurs et les moteurs.
- **Fusibles à limitation de courant** : Conçus pour réduire l'intensité du courant de défaut. Ils sont efficaces pour protéger contre les surcharges et les courts-circuits dans les systèmes de distribution

1.4.3.2.3 Paramètres de Sélection

La sélection d'un fusible moyenne tension adéquat nécessite la prise en compte de plusieurs paramètres, tels que [20]:

- **La tension nominale** : Doit être égale ou supérieure à la tension maximale du système.
- **Le courant nominal** : La capacité de support du fusible doit correspondre au courant normal de l'installation.
- **Le pouvoir de coupure** : Capacité du fusible à interrompre différents niveaux de courants de défaut.

Il est également crucial de considérer les conditions environnementales et les caractéristiques de l'installation électrique, comme la présence de vibrations ou d'humidité, pour assurer une protection efficace et durable [20].

1.4.3.2.4 Installation et Maintenance des Fusibles Moyenne Tension

L'installation des fusibles moyenne tension doit être réalisée avec soin et en conformité avec les normes de sécurité électrique. Il est essentiel de respecter les instructions du fabricant et de

s'assurer que le fusible est compatible avec le matériel électrique à protéger. De plus, une installation correcte garantit que le fusible fonctionnera de manière optimale en cas de surintensité [20].

La maintenance des fusibles moyenne tension est également cruciale pour la sécurité et l'efficacité du réseau électrique. Cela inclut des inspections régulières pour détecter d'éventuelles dégradations ou anomalies. En cas de déclenchement d'un fusible, il est impératif de le remplacer par un autre ayant les mêmes caractéristiques pour assurer une protection continue [20].

1.4.3.3 Disjoncteur

Le disjoncteur sert à protéger les départs, les transformateurs ou les moteurs. Dépendant du type choisi, le disjoncteur est fixe (mais facilement déconnectable) ou débrochable [14].

Les disjoncteurs moyenne tension sont des dispositifs conçus pour protéger les systèmes électriques en interrompant ou en arrêtant le flux de courant lorsqu'un défaut se produit. Ils sont généralement utilisés dans des systèmes avec des niveaux de tension allant de 1kV à 72,5kV, ce qui en fait un composant important des réseaux de distribution d'énergie moyenne tension.

Lorsqu'un défaut se produit dans un système électrique, tel qu'un court-circuit ou une surcharge, le courant circulant dans le système peut devenir dangereusement élevé. Les disjoncteurs moyenne tension sont conçus pour détecter ces conditions anormales et interrompre le flux de courant, protégeant ainsi le système contre les dommages et réduisant le risque d'incendie électrique [21].

Dans l'ensemble, les disjoncteurs moyenne tension sont un composant essentiel des systèmes électriques modernes, fournissant une couche importante de protection contre les défauts électriques et assurant la fourniture sûre et fiable de l'énergie électrique aux maisons, aux entreprises et à d'autres installations [21].

1.4.3.3.1 Choix d'un bon disjoncteur MT

Le choix du bon disjoncteur moyenne tension est crucial pour assurer le fonctionnement sûr et fiable des systèmes électriques.

Certains des facteurs clés à prendre en compte lors de la sélection d'un disjoncteur comprennent [21]:

- Niveau de tension : Sélectionnez un disjoncteur compatible avec le niveau de tension du système pour assurer un bon fonctionnement.
- Type d'application : Tenez compte de l'application spécifique du disjoncteur, telle que la distribution primaire ou la distribution secondaire, pour répondre aux exigences du système.
- Niveau de courant de défaut : Tenez compte du niveau de courant de défaut attendu dans le système et choisissez un disjoncteur avec une capacité d'interruption appropriée pour le gérer efficacement.
- Conditions environnementales : Évaluez les conditions environnementales dans lesquelles le disjoncteur fonctionnera, telles que la température, l'humidité et l'altitude, pour garantir ses performances et sa longévité.

En suivant ces directives, il est possible de sélectionner le disjoncteur le mieux adapté aux exigences spécifiques du système électrique, minimisant ainsi le risque de défaillance de l'équipement, de temps d'arrêt et de risques potentiels pour la sécurité [21].

Les technologies émergentes façonnent l'avenir des disjoncteurs moyenne tension, offrant des performances améliorées, une durabilité environnementale et un meilleur contrôle opérationnel [21].

1.4.3.3.2 Applications des disjoncteurs moyenne tension

Les disjoncteurs moyenne tension trouvent des applications dans diverses industries et systèmes électriques. Certaines des applications courantes incluent [21]:

1. Production d'énergie : sont utilisés dans les centrales électriques pour protéger les générateurs, les transformateurs et autres équipements contre les pannes et les surcharges. Ils assurent le fonctionnement sûr et fiable du système de production d'énergie.

2. Installations industrielles : sont utilisées dans les installations industrielles, telles que les usines de fabrication et les raffineries, pour protéger les équipements et les machines électriques. Ils permettent d'éviter les dommages aux équipements et les temps d'arrêt de la production dus à des pannes électriques.
3. Bâtiments commerciaux : sont installés dans les bâtiments commerciaux pour protéger les systèmes électriques, y compris les panneaux de distribution, l'appareillage de commutation et les transformateurs. Ils aident à maintenir une alimentation électrique stable, assurant un fonctionnement ininterrompu.
4. Projets d'infrastructure : sont utilisés dans des projets d'infrastructure tels que les réseaux de transport (chemins de fer, aéroports), les hôpitaux, les centres de données et les complexes commerciaux. Ils jouent un rôle essentiel dans la protection des infrastructures critiques et le maintien de la fiabilité du système.
5. Systèmes d'énergie renouvelable : avec l'adoption croissante des sources d'énergie renouvelables, les disjoncteurs moyenne tension sont des composants essentiels des centrales solaires et éoliennes. Ils protègent les onduleurs, les transformateurs et autres équipements contre les pannes et permettent une production d'énergie efficace.
6. Services publics et distribution d'énergie : font partie intégrante des entreprises de services publics et des réseaux de distribution d'électricité. Ils protègent les sous-stations, les appareillages de commutation et les lignes de distribution, assurant ainsi une distribution sûre et efficace de l'électricité aux consommateurs.
7. Exploitation minière et pétrole et gaz : sont utilisés dans les opérations minières et les installations pétrolières et gazières pour protéger l'équipement électrique et le personnel. Ils permettent d'éviter les situations dangereuses et d'assurer un fonctionnement continu dans ces environnements exigeants.

Ce ne sont là que quelques exemples de la large gamme d'applications des disjoncteurs moyenne tension. Leur importance dans le maintien de la sécurité du système électrique, la protection des équipements et la garantie d'une distribution d'énergie fiable est cruciale dans diverses industries et secteurs [21].



Figure 1.5 : Disjoncteur MT

Un courant traverse en général plusieurs appareils de protection en série, dont les calibres sont calculés et répartis en fonction des différents circuits à protéger. En cas de surintensité il y a bonne sélectivité lorsque seul l'appareil protégeant le circuit en défaut fonctionne. Mais il faut aussi assurer la protection de l'installation en cas de fort court-circuit : c'est le rôle de la filiation.

- ❖ Sélectivité ampèremétrique : répartition des valeurs de courant d'emploi : calibre Amont > calibre Aval.
- ❖ Sélectivité chronométrique : échelonnement des temps de déclenchement : délai de coupure Amont > délai de coupure Aval.
- ❖ Filiation : utilisation répartie des pouvoirs de coupure des appareils de protection : pouvoir de coupure Amont > pouvoir de coupure Aval [22].

1.5 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension des postes électriques et de leurs composants. Nous avons exploré les différentes structures des réseaux (HTB, HTA, BTB), leurs rôles respectifs dans le transport et la distribution de l'énergie, ainsi que les équipements essentiels tels que les tableaux électriques de moyenne tension, les interrupteurs-sectionneurs, les sectionneurs de terre, les fusibles et les disjoncteurs. Ces éléments assurent la protection, la sécurité et la fiabilité des systèmes électriques.

Cette analyse préliminaire est essentielle pour appréhender les défis liés à la gestion et à la sécurisation des réseaux électriques. En poursuivant cette étude, nous pourrions approfondir notre compréhension des technologies utilisées et des stratégies d'optimisation, contribuant ainsi à la modernisation et à la résilience des infrastructures électriques.

Chapitre 2

SYSTÈMES DE PROTECTION ET RÉSEAUX NEURONAUX POUR LA DÉTECTION DES DÉFAUTS ÉLECTRIQUES

2.1 INTRODUCTION

Les réseaux électriques ne sont pas à l'abri des défauts électriques qui diffèrent dans leur nature et leurs résultats en raison de plusieurs facteurs, notamment naturels et techniques. Par conséquent, un système de protection est conçu pour protéger les appareils électriques de toutes sortes de défauts. Le système de protection électrique est un système complexe et intelligent qui analyse tous les cas dans une circonstance standard, nous ne pouvons donc pas concevoir un seul appareil pour protéger l'ensemble du système. D'autre part, le réseau à protéger peut-être divisé en zones appelées zones de protection [23].

2.1.1 Les concepts fondamentaux dans les systèmes de protection des réseaux électriques

Plan de protection des départs HTA : le choix est relié à [23] :

- La structure des réseaux.
- Le mode d'exploitation.
- Le régime de neutre.

L'objectif d'élaborer des plans de protection :

- Un système de protection
- Préserver la sécurité des personnes et des biens.
- Évite la destruction partielle ou totale des matériels.
- Assure la meilleure continuité de fourniture des énergies possible.

2.2 QUALITE ET PERFORMANCES

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'obtenir le meilleur compromis entre [23]:

La sensibilité, la sélectivité, la rapidité, la fiabilité, la simplicité, le coût de système.

2.2.1 Organisation

L'implantation des protections doit être conçue pour [23]:

- Eliminer les défauts en séparant élément défectueux par un organe de coupure (disjoncteur, intercepteur, contacteur ...etc.)
- Eliminer un défaut par une protection amont quand une protection ou un organe de coupure aval est défaillant.
- Assuré éventuellement des protections secours (redondance des protections).
- Permettre la modification temporaire des fonctionnements (sensibilité, rapidité) pour effectuer certaine opération d'exploitation, travaux sous tension, mise en parallèle des départs. L'ensemble de ces dispositions est appelé : plan de protection.

2.3 LES DEFAUTS DANS LES RÉSEAUX ELECTRIQUES

Un défaut est une condition anormale qui implique une défaillance des équipements du système d'alimentation fonctionnant à l'une des tensions primaires du système. Les causes des défauts survenant dans les systèmes électriques sont diverses. La rupture de l'isolation peut être causée par des coups de foudre sur les lignes aériennes. La liaison avec la terre est alors établie par un fil de terre. De plus, cette connexion à la terre se produit lorsqu'un arbre ou un objet artificiel fournit le chemin de la liaison. Certains défauts sont également causés par des erreurs de commutation du personnel de la station. Les défauts peuvent être des défauts shunt, en série ou une combinaison de défauts shunt et en série. Dans le cas d'un défaut shunt, il y a un flux de courant entre deux ou plusieurs phases, ou entre les phases et la terre. Un défaut en série est une anomalie pour laquelle les impédances des trois phases ne sont pas égales, généralement causée par l'interruption d'une ou deux phases [24] .

La plupart des défauts du système électrique se produisent dans les lignes de transmission, en particulier sur les lignes aériennes. Les lignes sont les éléments du système qui sont chargés de

transporter d'importantes quantités d'énergie des centrales électriques aux clients (charges). En raison de leur caractéristique inhérente d'être exposées aux conditions atmosphériques, elles présentent le taux de défaillance le plus élevé du système. C'est pourquoi un certain nombre de chercheurs ont consacré beaucoup d'efforts à la protection des lignes et à la localisation des défauts [24].

2.3.1 Types de défauts

Les défauts électriques dans le réseau triphasé sont principalement classés en deux types, à savoir les défauts de circuit ouvert et de court-circuit. En outre, ces défauts peuvent être symétriques ou non symétriques [25].

➤ 1^{er} type : Défauts de circuit ouvert

Ces défauts sont dus à la rupture d'un ou de plusieurs conducteurs. Leurs causes les plus courantes sont les défaillances de câbles et de lignes aériennes, d'une ou de plusieurs phases du disjoncteur et la fusion d'un fusible ou d'un conducteur dans une ou plusieurs phases. Les défauts de circuit ouvert sont également appelés défauts en série [25].

Pendant ce type de défaut, un courant déséquilibré circule dans le système, chauffant ainsi les machines tournantes. En outre, considérons qu'une ligne de transmission fonctionne avec une charge équilibrée avant l'apparition d'un défaut de circuit ouvert. Si l'une des phases fond, la charge réelle de l'alternateur est réduite et cela provoque une augmentation de l'accélération de l'alternateur, qui fonctionne alors à une vitesse légèrement supérieure à la vitesse synchrone. Cette vitesse excessive entraîne des surtensions dans d'autres lignes de transmission. Des dispositifs de protection donc doivent être mis en œuvre pour faire face à de telles conditions anormales [26].

En effet, c'est la ligne de transmission qui contribue le plus à l'instabilité du système électrique, ce qui justifie l'intérêt porté à la protection des lignes de transmission. D'autre part, il existe de nombreuses solutions de protection de la ligne de transmission proposées par les principales entreprises de protection des lignes de transmission [27].

Cependant, les solutions proposées ne sont pas parfaites, ce qui laisse la place à d'autres études afin d'améliorer les solutions actuelles. En intégrant des solutions basées sur l'intelligence artificielle capable de détecter rapidement le défaut, identifier son type et donner sa localisation précise afin de l'éliminer [24].

➤ **2^e type : Défauts de court-circuit**

Un court-circuit peut être défini comme une connexion anormale de très faible impédance entre deux points de potentiel différent, qu'elle soit faite intentionnellement ou accidentellement. Il s'agit du type de défaut le plus courant et le plus grave, qui entraîne la circulation de courants anormalement élevés dans les équipements ou les lignes de transmission. Si on laisse ces défauts persister, même pendant une courte période, cela entraîne des dommages importants aux équipements. Les défauts de court-circuit sont également appelés défauts de dérivation (shunt). Ces défauts sont causés par un défaut d'isolation entre les conducteurs de phase ou entre la terre et les conducteurs de phase ou les deux [24].

Ces défauts se produisent rarement en pratique par rapport aux défauts non symétriques. Il existe deux types de défauts symétriques : les défauts triphasés (L-L-L) et les défauts triphasés à la terre (L-L-L-T).

Les défauts symétriques représentent en gros entre 2 et 5 % de l'ensemble des défauts du système [25]. Cependant, s'ils se produisent, ils causent un dommage très grave aux équipements même si le système reste en état d'équilibre. L'analyse de ces défauts est nécessaire pour sélectionner la capacité de rupture des disjoncteurs, choisir le réglage des relais de phase et autres dispositifs de protection. Ces défauts sont analysés par phase en utilisant la matrice d'impédance de bus ou le théorème de Thevenin [24].

➤ **3^e type : Les défauts non symétriques**

Les défauts les plus courants qui se produisent dans le réseau électrique sont les défauts asymétriques. Ce type de défaut donne lieu à des courants de défaut asymétriques (ayant des amplitudes différentes avec un déphasage inégal). Ils sont également appelés défauts

déséquilibrés, car ils provoquent des courants déséquilibrés dans le système. Les défauts asymétriques comprennent à la fois les défauts de circuit ouvert (état ouvert monophasé et biphasé) et les défauts de court-circuit (à l'exclusion des L-L-L-T et L L-L) [24]..

Les défauts asymétriques sont analysés en utilisant des méthodes de composants asymétriques afin de déterminer la tension et les courants dans toutes les parties du système. Son analyse est plus difficile que celle des défauts symétriques [24].

2.3.2 Détection de défaut

La détection des défauts est une question qui occupe les ingénieurs depuis la création de la technologie des systèmes électriques. Non seulement elle joue un rôle important dans l'exploitation et le contrôle des réseaux électriques, mais une détection précise des défauts améliore les performances opérationnelles et protège contre des éventualités indésirables. La précision et la vitesse de détection sont des mesures de l'efficacité du mécanisme de détection ; plus ce mécanisme est rapide, plus il est possible de protéger l'équipement et éviter des dépenses énormes, en général, la détection des défauts est effectuée avant la classification et la localisation des défauts [28].

En général, les algorithmes utilisés sont similaires à ceux appliqués à des relais de protection, cependant, lorsqu'ils sont réalisés hors ligne, ils peuvent adopter des principes plus sophistiqués pour la réduction des erreurs. [28]

Souvent, cette partie de la procédure commune est réalisée par le relais de protection qui fournit au localisateur de défauts les informations nécessaires sur le défaut identifié et les données enregistrées. Un certain nombre d'approches de la détection des défauts sont proposées dans la littérature. Les conditions anormales (pas nécessairement des défauts) sont détectées en surveillant les impédances de phase et/ou les amplitudes de courant de phase et/ou les amplitudes de tension de phase et/ou l'amplitude de courant homopolaire [29].

En fonction d'une application particulière, différents critères d'activation sont combinés de manière différente. La mise en œuvre d'un détecteur de défauts n'est pas une procédure

difficile, car les microprocesseurs électroniques à grande vitesse, les techniques avancées de traitement numérique des signaux et les systèmes matériels embarqués spécialisés offrent des méthodes de mise en œuvre matérielles suffisantes et satisfaisantes [29].

2.3.3 Localisation des défauts

Un nombre considérable d'études ont porté sur la localisation des défauts, dans la mesure où la localisation précise des défauts dans les lignes électriques et les systèmes de distribution peuvent réduire considérablement le délai de rétablissement. La plupart des défauts qui se produisent habituellement sur les lignes aériennes haute tension sont des défauts monophasés à la terre. Les relais de protection et le réenclencheur automatique ont été utilisés pour surveiller les lignes de transmission et de distribution. En cas de défaut, le réenclencheur déclenche la ligne et, une fois le défaut éliminé, il met immédiatement la ligne sous tension. Si le défaut se produit sur la ligne de transmission ou de distribution, le relais doit être capable de détecter le plus rapidement possible tout type de défaut qui pourrait se produire et envoyer un signal de déclenchement au disjoncteur [28].

2.4 INTRODUCTION AU RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS

Le réseau neuronal artificiel RNA est un modèle mathématique inspiré des réseaux de neurones biologiques, développés pour imiter intelligemment la façon dont le cerveau humain traite l'information et apprend par l'expérience. Il s'agit d'un système adaptatif dont la structure change en fonction de la phase d'apprentissage et qui réagit aux nouveaux événements de la manière la plus appropriée sur la base des expériences acquises lors de l'entraînement. Leur capacité à apprendre les relations complexes non linéaires d'entrée/sortie a motivé les chercheurs à les appliquer pour résoudre des problèmes non linéaires liés à divers domaines. Ils présentent les avantages inhérents d'une excellente immunité au bruit et d'une grande robustesse, ce qui fait que les approches basées sur les RNA sont moins susceptibles de changer avec les conditions de fonctionnement que les approches conventionnelles liées à l'ingénierie des systèmes électriques [28].

2.4.1 Apprentissage d'un réseau de neurone

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurone durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré, l'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. Dans le cas des réseaux de neurone artificiels on ajoute souvent à la description un modèle de l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt dans la majorité des algorithmes actuels. Les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids de connexion [30].

2.4.2 Type d'apprentissage

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé. Cette distinction repose sur la forme des exemples d'apprentissage. Dans le cas de l'apprentissage supervisé, les exemples sont des couples (Entrée, Sortie associée) alors que l'on ne dispose que des valeurs (Entrée) pour l'apprentissage non supervisé [31].

2.4.2.1 Apprentissage Supervisé

L'apprentissage "supervisé" pour les réseaux de neurones formels, consiste à calculer les coefficients synaptiques de telle manière que les sorties du réseau soient, pour les exemples utilisés lors de l'apprentissage, aussi proches que possibles des sorties "désirées". Ils peuvent être la classe d'appartenance de [32]:

- La forme que l'on veut classer,
- La valeur de la fonction que l'on veut approcher,
- La sortie du processus que l'on veut modéliser,
- La sortie souhaitée du processus à commander.

On connaît donc, en tout point ou seulement en quelques points les valeurs que doit avoir la sortie du réseau en fonction des entrées correspondantes : C'est en ce sens que l'apprentissage est "supervisé" [32].

Imaginez que vous commenciez à apprendre le chinois. Pour ce faire, il vous faudra soit acheter un livre de traduction chinois-français, ou bien trouver un professeur de chinois. Le rôle du

professeur ou du livre de traduction sera de superviser votre apprentissage en vous fournissant des exemples de traductions français-chinois que vous devrez mémoriser. On parle ainsi d'apprentissage supervisé lorsque l'on fournit à une machine beaucoup d'exemples qu'elle doit étudier [33]. L'apprentissage supervisé consiste à modifier les poids du réseau dans le but de minimiser l'erreur entre les exemples d'entrée présentés et les valeurs de sortie cible [24].

Pour maîtriser l'apprentissage supervisé, il faut absolument comprendre et connaître les 4 notions suivantes [33]:

- Le Dataset
- Le Modèle et ses paramètres
- La Fonction Coût
- L'Algorithme d'apprentissage

Si les classes (ex. décisions optimales) sont prédéterminées et les résultats sont connus, le système apprend selon un modèle de classification. Les techniques typiques sont Support Vector Machines (SVM), artificiel neural network (ANN) ou Deep Learning (DL) [34].

2.4.2.2 L'apprentissage non supervisé

Il n'y a pas de relation définie entre les entrées et les sorties. L'apprentissage est effectué sur la base d'un ensemble d'exemples où seules les conditions d'entrée sont connues. Dans le processus d'apprentissage, ces exemples sont sélectionnés en respectant un certain principe de similarité. Un tel réseau peut être considéré comme un système autoorganisé qui apprend sur un principe de concurrence [24].

L'algorithme doit découvrir par lui-même la structure plus ou moins cachée des données. L'intérêt est de trouver des corrélations entre les données très variées que l'humain (même expert) ne verrait pas. Les exemples typiques sont K-means et Anomaly detection [34].

2.4.2.3 Apprentissage par renforcement

Il consiste, pour un agent autonome (robot, etc.), à apprendre les actions à prendre, à partir d'expériences, de façon à optimiser une récompense quantitative au cours du temps. L'agent est plongé au sein d'un environnement, et prend ses décisions en fonction de son état courant.

En retour, l'environnement procure à l'agent une récompense, qui peut être positive ou négative. L'agent cherche, au travers d'expériences itérées, un comportement décisionnel (appelé stratégie ou politique, et qui est une fonction associant à l'état courant l'action à exécuter) optimal, en ce sens qu'il maximise la somme des récompenses au cours du temps [24].

L'apprentissage par renforcement se distingue de l'apprentissage supervisé par le fait qu'il n'est pas nécessaire de présenter des paires entrées/sorties étiquetées ni de corriger explicitement les actions sous-optimales. Au lieu de cela, l'accent est mis sur la recherche d'un équilibre entre l'exploration (d'un territoire inexploré) et l'exploitation (des connaissances actuelles). Les algorithmes d'apprentissage par renforcement partiellement supervisés peuvent combiner les avantages des algorithmes supervisés. Cette méthode d'apprentissage a été adoptée dans le domaine de l'intelligence artificielle afin de diriger l'apprentissage automatique non supervisé à l'aide de récompenses et de pénalités. Elle est souvent utilisée dans le cadre de la robotique, de la théorie des jeux et des véhicules autonomes [24].

En outre, lors de l'élaboration des données d'apprentissage, les données doivent être représentatives de tous les scénarios possibles dans lesquels l'RNA sera appelé à exercer ses fonctions de détection, classification et de localisation. Ainsi, training data peuvent devenir d'énormes ensembles de données [24].

Apprentissage par renforcement (ou reinforcement learning, RL) : l'algorithme apprend de sa propre expérience. L'action de l'algorithme sur l'environnement produit une valeur de retour qui guide son apprentissage. Les exemples typiques sont Q-Learning et PPO [34].

2.4.3 Les avantages et les inconvénients de RNA [34]

A. Les avantage :

- Tolérance par rapport aux fautes (élimination d'un neurone...)
- Apprentissage automatique des poids
- Capacité de généralisation

B. Les inconvénients :

- Représentation complexe
- Paramètres difficiles à interpréter physiquement (boîte noire)

2.5 APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE DANS LA PROTECTION ET LE CONTROLE DES SYSTEMES ELECTRIQUES.

La transformation numérique en cours de l'industrie de l'énergie électrique entraîne la disponibilité de grandes quantités de données qui offrent une opportunité d'améliorer l'efficacité, la fiabilité et la sécurité des opérations du système électrique. Cela devient particulièrement difficile en raison de la forte pénétration des ressources énergétiques distribuées basées sur des onduleurs. L'évolution rapide des technologies de communication, d'informatique et d'intelligence artificielle peut aider à résoudre bon nombre des défis auxquels nous sommes confrontés [35] .

2.5.1 Définition de l'intelligence artificielle

En termes pratiques, l'intelligence peut être définie de plusieurs manières : compréhension avancée, capacité à faire progresser le raisonnement existant, connaissance démonstrative et prise de décision apprise. L'intelligence peut être démontrée à l'aide de machines, de manière similaire à l'intelligence naturelle manifestée par les humains. Un développement adaptatif est nécessaire à différentes étapes, telles que la cognition, la manipulation, la rationalisation, la communication et la réaction à toute transaction courante. Ici, l'expérience d'apprentissage continu facilite le défi de l'amélioration automatisée de la performance globale du système au fil du temps [35].

L'intelligence artificielle (IA) est la simulation de l'intelligence humaine dans des machines qui pensent et agissent comme des humains. Une application efficace de l'IA nécessite l'incorporation de nombreuses compétences telles que la cognition, la manipulation, la rationalisation, la communication et la réaction [35] .

2.5.2 Intégration de l'IA et de l'apprentissage automatique dans la gestion des systèmes électriques

L'IA utilise l'apprentissage automatique (AA) et d'autres techniques associées telles que l'heuristique pour résoudre de véritables défis. Divers outils computationnels utilisés pour mettre en œuvre ces compétences comprennent la recherche et l'optimisation, les réseaux de neurones artificiels, la logique floue, les méthodes probabilistes pour le raisonnement incertain, l'apprentissage par renforcement, ainsi que d'autres méthodes d'apprentissage supervisé et non supervisé. L'AA est un sous-domaine de l'intelligence artificielle qui permet de rassembler et d'analyser de grands volumes de données pour extraire des caractéristiques représentatives basées sur un apprentissage approprié et développer une équation ou un algorithme pour en tirer des informations ou des actions utiles. Par exemple, la reconnaissance de texte dans des images est aujourd'hui un outil couramment utilisé (OCR, reconnaissance optique de caractères) qui est alimenté par l'AA. Les modèles OCR peuvent rechercher des informations pertinentes en utilisant des caractéristiques représentatives pour identifier le texte de manière prédictive plutôt que programmatique [35] .

L'AA, ou ses versions antérieures de « réseau de neurones artificiels », est en pratique dans l'industrie des systèmes électriques, en particulier dans les opérations, la gestion de la main-d'œuvre et la planification depuis un certain temps. Parmi les exemples figurent la prévision, l'optimisation, la planification et l'engagement des unités. En raison de la récente progression de la transformation numérique dans des domaines tels que l'informatique en nuage (CC), l'Internet des objets (IoT) et l'utilisation de l'AA pour élargir les techniques antérieures, une hausse de l'IA ou de l'AA revêt une signification supplémentaire dans de nombreuses applications des systèmes électriques.

Par exemple [35] :

- L'IA/AA peut aider à détecter et localiser plus rapidement les défauts à haute impédance.

- L'IA/AA peut aider à prédire et isoler les défaillances potentielles des composants en utilisant les données des capteurs de décharges partielles.
- L'IA/AA peut être utilisée pour évaluer les défis liés aux stabilités dynamiques du réseau électrique et soutenir la prise de décision en utilisant les données et l'architecture des unités de mesure et de contrôle des phaseurs, atténuant ainsi les défis de contrôle de la stabilité dus à l'augmentation des ressources à faible inertie.

2.5.3 Limitations des technologies de protection et de contrôle existantes

Des pannes peuvent survenir sur tout équipement ou composant électrique en raison de diverses causes telles que des conditions météorologiques extrêmes, le vieillissement, l'impact dû à un stress répété, des conditions environnementales défavorables entraînant une dégradation de l'isolation, des dommages internes ou externes pendant la construction, etc. Cela peut entraîner des interruptions de service d'un actif spécifique ou de l'ensemble du réseau, en fonction de la conception du système électrique, de la gravité, et de la couverture de la zone de protection (par exemple, ligne, transformateur, réacteurs, bus, générateurs, charges) [35] .

Les schémas de protection des systèmes électriques conventionnels ont été appliqués avec succès pour fournir des fonctions de protection adéquates dans la plupart des conditions du système électrique, y compris les conditions de fonctionnement normales et divers scénarios de panne. Cependant, il existe des conditions où ces schémas de protection ont montré leurs limites, de sorte que les schémas existants n'ont pas pu fournir de protections adéquates ou que l'équilibre souhaité entre performance et dépendabilité/sécurité des schémas de protection n'a pas pu être atteint. Les schémas de protection conventionnels fonctionnent le mieux lorsque les conditions du système électrique nécessitant des actions de protection sont très différentes de toutes les autres conditions où aucune action n'est nécessaire. Certains schémas de protection (par exemple, les schémas de protection hors de phase, les schémas de protection de l'intégrité du système) fonctionnent mieux lorsque le système électrique où les schémas sont appliqués n'est pas dynamique en termes de topologie, mais peuvent avoir des difficultés à équilibrer les exigences de dépendabilité et de sécurité si la topologie du système électrique est dynamique [35] .

D'autre part, la conception de certains schémas de protection pour des systèmes électriques dynamiques ou complexes est une combinaison de science et d'art. Cela signifie qu'il peut ne pas exister de conceptions « standard » pour de tels défis de protection. Les solutions proposées par différents ingénieurs peuvent varier, ce qui peut entraîner des différences parmi les systèmes électriques où elles sont appliquées et/ou des différences dans l'expérience personnelle et les connaissances des concepteurs. La situation décrite est courante, par exemple, dans les nouveaux projets de réseau de transmission. Les nouveaux projets modifient une partie du système électrique et peuvent créer des topologies complexes en raison de conditions de court-circuit faibles avec un rapport d'impédance source élevé (SIR), des entrées, ou des configurations spéciales comme les lignes à trois terminaux. Selon les réglementations de certains pays, dans de nombreux cas, les projets ne remplacent pas les systèmes de protection existants des éléments existants, et les ingénieurs en protection doivent développer des réglages pour les systèmes de protection nouveaux et existants afin de maintenir une bonne coordination de protection. Les systèmes de protection existants peuvent poser des défis si la téléprotection n'est pas disponible pour les protections à distance ou si seuls des relais de surintensité sont disponibles. Dans ces cas, les temps de défaillance réglementaires sont difficiles à respecter et même les performances de la coordination de la protection de secours peuvent être insuffisantes si la redondance n'est pas disponible [35] .

Dans les études de coordination de protection, le principal défi lors du calcul et de la vérification des réglages de protection est d'atteindre des réglages fiables pour la plupart des scénarios d'exploitation du système électrique (réglages optimaux). L'expansion du système électrique, les nouvelles dynamiques des équipements et la maintenance ajoutent constamment plus de complexité pour trouver les réglages optimaux des systèmes de protection [35] .

Les relais basés sur des microprocesseurs sont essentiellement des ordinateurs industriels dont les réglages sont déterminés par les algorithmes de protection. La détection, le cadran, la portée de zone et le temps de fonctionnement sont les premiers éléments à l'esprit, mais il y en a beaucoup d'autres qui nécessitent également une attention. Parmi eux, on trouve la polarisation, la sélection de phase, la directionnalité, les logiques de blocage, etc. Selon l'élément ou la

fonction de protection, il peut être nécessaire de réviser les réglages pour optimiser la coordination de protection dans tous les scénarios d'exploitation possibles [35] .

En présence d'une forte pénétration des ressources basées sur des onduleurs, de nombreux défis se posent lors de l'utilisation de méthodes analytiques classiques pour résoudre des contingences complexes afin de déterminer les réglages de protection optimaux.

2.5.4 Les opportunités d'IA dans le domaine de la protection et de la réparation (P&C)

2.5.4.1 Etapes principales du processus (P&C) sur lesquelles IA pourrait avoir un impact

Les principales étapes du processus P&C que l'IA pourrait affecter sont illustrées dans le schéma suivant [35] :

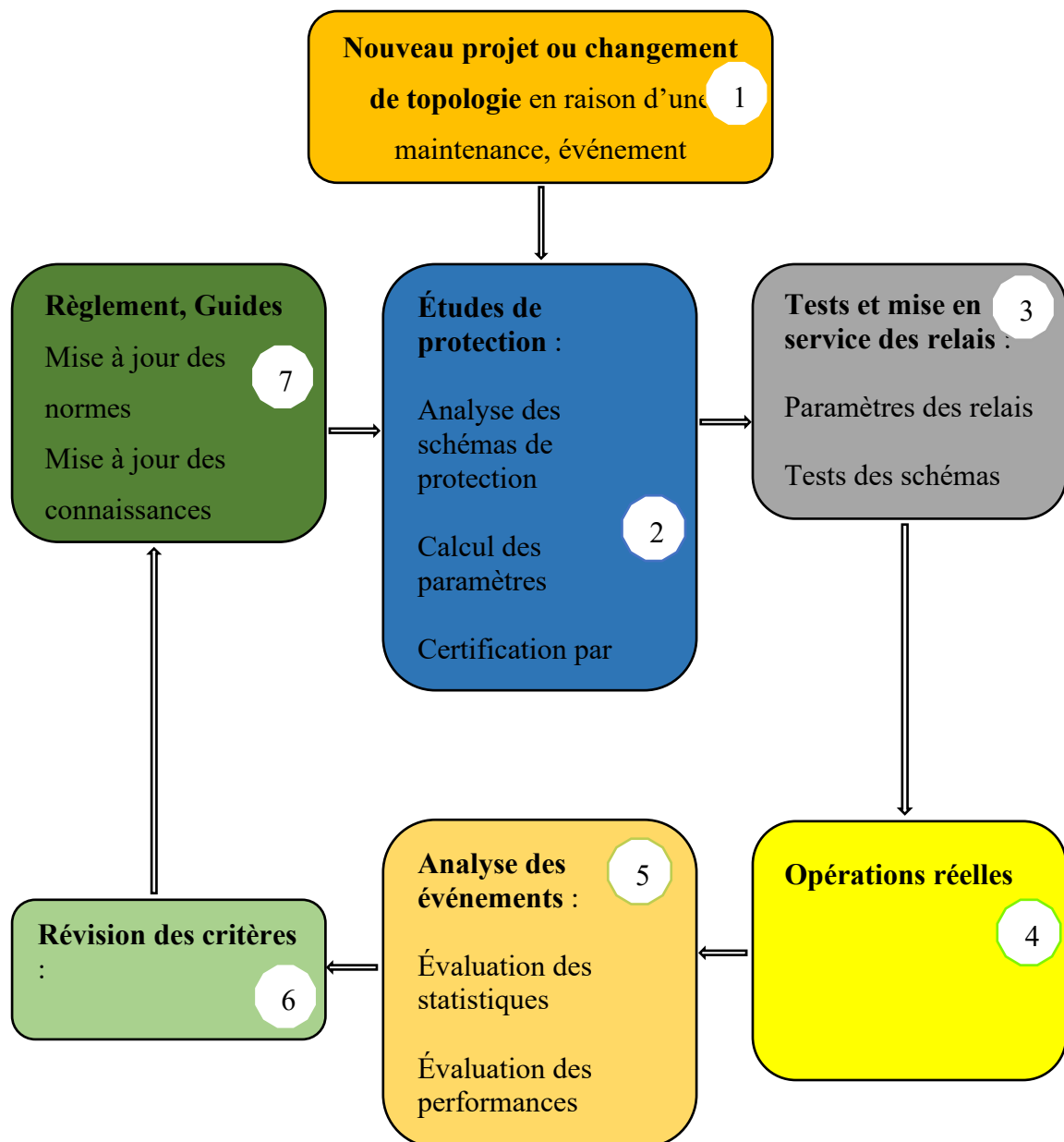


Figure 2.1 : Les principales étapes du processus P&C

L'IA et l'apprentissage automatique (AA) peuvent parfois améliorer les fonctions existantes de protection et de contrôle des systèmes électriques que les relais à microprocesseur effectuent actuellement, comme une application d'IA pour traiter l'arc secondaire. Cela permet aux ingénieurs de prendre des décisions plus éclairées par les données en apprenant et en créant des modèles à partir de données historiques et quasi en temps réel. En s'appuyant sur ces données pour prendre des décisions de protection et de contrôle, les ingénieurs peuvent adapter efficacement leur approche afin de tenir compte d'un réseau dynamique dont les propriétés et

caractéristiques électriques évoluent. L'intelligence artificielle pourrait créer des efficacités en ajoutant de la valeur et des insights à diverses étapes du processus de protection et de contrôle [35] .

Chacune des tâches ci-dessus offre une opportunité pour qu'un aspect de l'IA/AA assiste soit les ingénieurs, soit les dispositifs P&C à réagir plus rapidement, être plus précis et devenir plus efficaces. Les applications et cas d'utilisation qui bénéficient de l'IA/AA sont discutés dans les sections suivantes. Ces discussions soulignent comment chaque application tire parti de l'IA/AA et son impact sur les différentes étapes. En général, l'IA/AA peut compléter et aider les ingénieurs en protection, mais ne les remplacera jamais [35] .

2.5.4.2 Considérations avant d'utiliser l'IA dans la protection

Bien qu'il existe des opportunités d'utilisation de l'IA pour la protection, avant d'utiliser toute nouvelle méthode pour améliorer la technologie et les pratiques existantes, une évaluation philosophique ainsi qu'une évaluation technique des avantages et inconvénients de la nouvelle méthode s'impose. Les principes et applications de la protection des systèmes électriques ont été affinés et perfectionnés au fil des décennies d'expérience pratique et plusieurs révolutions technologiques. Étant donné que le succès de la protection améliore la sécurité d'équipements valant des millions de dollars, et plus important encore, des vies humaines, les ingénieurs en protection ont traditionnellement préféré des modèles basés sur la physique qui sont transparents et relativement simples.

Il est intéressant de noter que la création et la classification de motifs, deux composants fondamentaux des méthodes basées sur l'apprentissage automatique qui aident à construire l'IA dans un système, font déjà partie intégrante de la protection. Pratiquement chaque relais utilise une caractéristique ou une combinaison de caractéristiques (motif), ainsi qu'un classificateur basé sur des règles. Une caractéristique est typiquement une transformation dans le domaine fréquentiel d'une mesure dans le domaine temporel – courant, tension, fréquence, puissance, impédance, contenu harmonique, contenu haute fréquence, etc. Un motif est créé par le biais des blocs logiques combinatoires fournis dans les relais numériques. Un classificateur a

généralement deux classes : Défaut & Pas de Défaut. Le plan de séparation pour le classificateur est une valeur seuil (pour la caractéristique) ou une combinaison de valeurs seuils (pour le motif). Les valeurs et combinaisons sont déterminées par l'analyse systémique, la physique et les modèles basés sur la physique, ainsi que par l'expérience. Ici, l'expérience est simplement une représentation de l'esprit humain apprenant à partir des données passées. La différence est que l'apprentissage dans les applications d'apprentissage automatique se produit (ou que l'expérience est acquise) par le biais d'algorithmes développés et perfectionnés par des informaticiens. Dans les applications utilisant de grands ensembles de données, il a été démontré que ces algorithmes "digèrent" les données mieux qu'un esprit humain ne peut le faire. Les méthodes basées sur l'apprentissage automatique tendent également à créer et à utiliser des motifs assez complexes en utilisant des transformations mathématiques sur des données brutes. De telles transformations, lorsqu'elles sont utilisées pour créer un modèle basé sur les données d'un processus physique, donnent souvent lieu à des quantités qui perdent leur relation directe avec la physique sous-jacente au processus qu'elles tentent de modéliser. Ces observations soulèvent deux questions philosophiques qui doivent être prises en compte avant d'appliquer l'IA pour améliorer ou remplacer une méthode basée sur la physique existante [35] :

1. Si l'IA utilise les mêmes caractéristiques/motifs que ceux utilisés par les relais, pourquoi serait-elle capable de créer un classificateur plus fiable et sécurisé ?
2. Si l'IA utilise des caractéristiques/motifs plus complexes et abstraits qui n'ont aucune relation transparente avec la physique sous-jacente, et que les seuils (plans de séparation) sont créés simplement en apprenant à partir des données, pourquoi cela fonctionnerait-il mieux ?

2.5.4.3 Cadre d'apprentissage coordonné basé sur l'apprentissage automatique hors ligne/en ligne

En prolongeant cette réflexion derrière ces questions posées précédemment, si une protection héritée ne fonctionne pas dans certaines conditions du système, pourquoi une méthode basée sur l'IA fonctionnerait-elle ? Si elle utilise les mêmes motifs que le relais hérité utilise ou peut utiliser, appliquer un apprentissage à ces motifs ne produira pas

nécessairement un meilleur résultat, car ces motifs ont échoué. Une question concernant des motifs opaques pour résoudre ce problème est également valide dans ce cas [35].

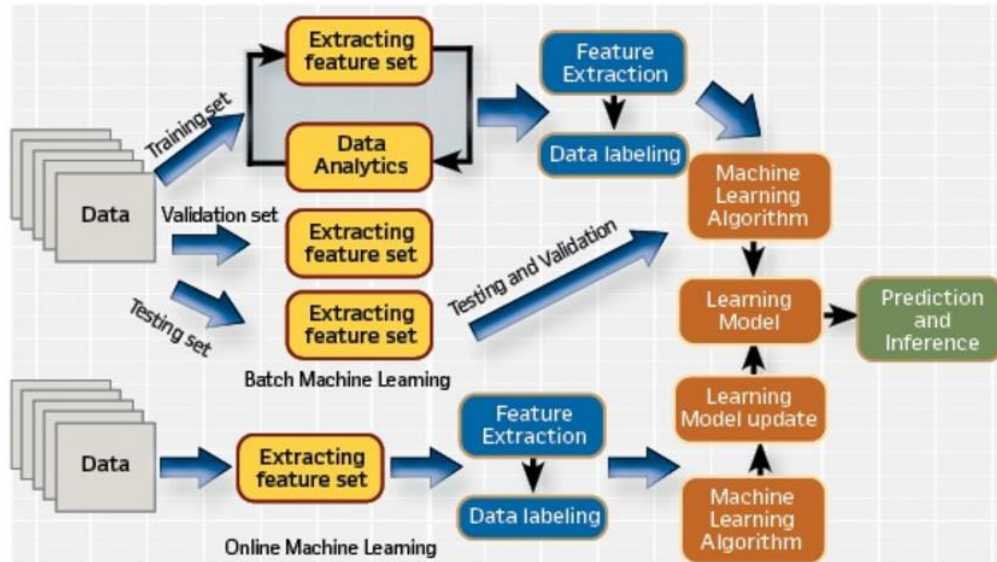


Figure 2.2 : Cadre d'apprentissage coordonné basé sur l'apprentissage automatique hors ligne/en ligne [35]

Cette discussion s'oppose au remplacement des méthodes éprouvées basées sur la physique par des solutions basées sur l'IA sans justifications claires, même si les méthodes existantes échouent occasionnellement. Malheureusement, un grand nombre de publications sur ce sujet adoptent cette approche. Ces articles ignorent également le fait que la protection des systèmes électriques est un système qui englobe des schémas de protection localisés interdépendants. Remplacer un ou quelques-uns de ces schémas par une méthode basée sur l'apprentissage automatique (AA) peut ne pas être compatible avec la nature holistique de la protection des systèmes électriques. Une approche pragmatique pourrait consister à compléter les méthodes conventionnelles basées sur la physique par des approches d'AA inspirées de la biologie afin de fournir une couverture maximale de protection et d'optimiser la fiabilité et la sécurité en fonction des exigences des actifs et des systèmes. Cette partie présentera des exemples d'applications de l'IA qui ont montré ou pourraient potentiellement aider à améliorer les protections dans les cas où les modèles physiques sous-jacents ne sont pas précis ou absents, entraînant des faiblesses connues [35].

2.5.5 Domaines spécifiques d'application de l'IA/AA en protection et contrôle

La protection des systèmes électriques est classée en deux catégories : la protection des actifs et la protection du réseau.

La fonction de protection des actifs implique la détection des défauts ou des conditions anormales, la discrimination des zones ou dispositifs défectueux, l'identification des types de défauts et la prise de décisions de déclenchement ou de blocage, parfois de manière adaptative [35].

Les fonctions de protection du réseau, telles que le Système de Protection de l'Intégrité du Système (SIPS), les Schémas d'Action Corrective (RAS) et les Systèmes de Surveillance, Protection et Contrôle à Grande Échelle (WAMPAC), nécessitent la reconnaissance de conditions critiques rares impactant les systèmes électriques en surveillant un ensemble diversifié de variables. Ces systèmes, dès qu'ils détectent des conditions critiques, initient des actions de contrôle d'urgence [35].

Quelles que soient les priorités, la conception de la fonction/algorithme de protection, l'analyse du système, le choix des réglages et la coordination nécessitent souvent des compromis entre la sécurité (absence de déclenchements intempestifs), la rapidité d'exécution et la fiabilité (absence d'opérations manquées).

Plus un relais est sécurisé (tant l'algorithme que ses réglages), moins il a tendance à être sensible ou à fonctionner rapidement. Inversement, plus le relais est rapide, plus il a tendance à fonctionner faussement. La conception et la coordination des fonctions de protection des actifs et du réseau pour atteindre les objectifs souhaités en matière de fiabilité et de coût peuvent devenir un problème d'optimisation complexe dans les systèmes électriques modernes. À mesure que le réseau devient plus dynamique, l'objectif d'optimisation devient une cible mouvante, et les réglages et hypothèses statiques peuvent ne pas suffire [35].

2.5.6 Protection des actifs

Les limitations des techniques classiques de protection des actifs peuvent découler de l'étendue des informations disponibles par l'approche consistant à utiliser les mêmes mesures que celles

utilisées par les relais existants (par exemple, la fréquence d'échantillonnage) et/ou des limitations des algorithmes de relais utilisés pour la détection et la discrimination. Ces limitations peuvent se manifester sous la forme d'une vitesse et d'une sensibilité aux défauts à haute impédance qui ne sont pas idéales, ou d'une adaptabilité à diverses conditions telles que l'impédance de source élevée, les lignes compensées en série, les sources basées sur des onduleurs, etc. [35]

Pour atténuer ces limitations des principes de relais classiques, il est possible d'améliorer et d'étendre la gamme de mesures disponibles pour la prise de décision et d'améliorer le processus de reconnaissance lui-même. Par exemple, les signaux transitoires haute fréquence contenus dans les signaux d'entrée peuvent être utilisés pour détecter et discriminer les défauts à haute impédance, les arcs et les défauts évolutifs, qui sont difficiles à traiter par les fonctions de protection traditionnelles basées sur les phasors à fréquence de puissance.

Cependant, les lois du circuit appliquées à des modèles simplifiés ne peuvent pas caractériser la relation entre le contenu haute fréquence et la localisation/sévérité du défaut. Dans de telles situations, des techniques d'IA/AA peuvent être utilisées pour entraîner des classificateurs afin de prendre des décisions basées sur diverses signatures contenues dans les composants haute fréquence des mesures d'entrée.

Au cas par cas, les ingénieurs peuvent envisager d'exploiter des modèles d'IA/AA pour augmenter la sélectivité, la sécurité et la rapidité des principes de relais classiques en [35]:

- Optimisant les réglages et en utilisant des approches hybrides qui combinent plusieurs principes de relais
- Corrigeant automatiquement les signaux de transformateurs de courant (CT) et de transformateurs de tension (VT)
- Employant des algorithmes non conventionnels

2.5.7 Protection du réseau

En ce qui concerne la protection du réseau, des avancées significatives ont été réalisées dans le domaine des technologies d'évaluation de la sécurité en ligne, capables de déterminer les

contingences critiques, les limites de transfert et les mesures correctives. Cependant, les techniques numériques conventionnelles basées sur des études hors ligne sont généralement chronophages et ne conviennent donc pas toujours aux applications en temps réel. De plus, ces méthodes souffrent de problèmes de mauvaises classifications et/ou de fausses alertes. De nombreuses études montrent que les techniques d'IA et d'apprentissage automatique peuvent être appliquées pour développer des systèmes RAS et WAMPAC efficaces afin de détecter en temps réel des conditions critiques ou anormales du réseau et de proposer ou d'activer automatiquement des actions correctives (figure 2.3) [35].

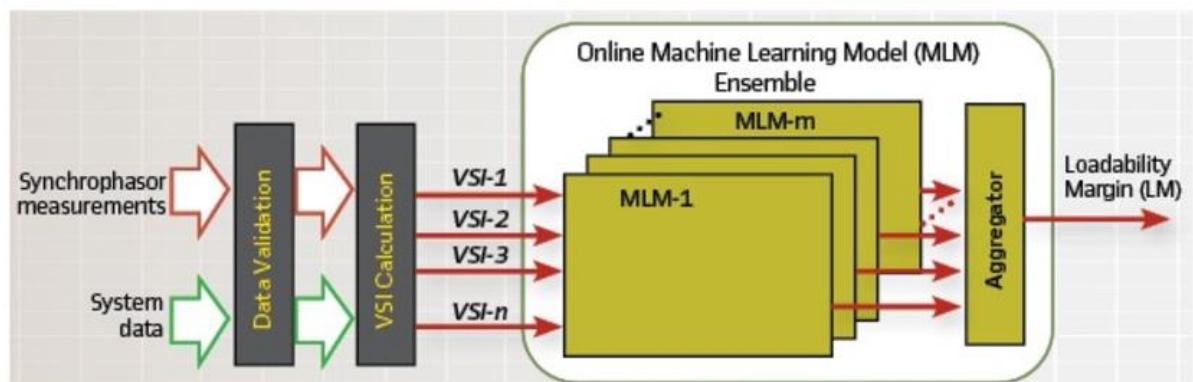


Figure 2.3 : Système de surveillance de la stabilité de la tension en temps réel (VSM) proposé [35]

2.5.8 Analyse post-événement

Un autre contexte où l'IA et l'apprentissage automatique peuvent être très utiles est l'analyse post-événement grâce à l'analyse des données. Les techniques modernes de fouille de données sont essentielles lorsqu'il est nécessaire d'analyser de grands ensembles de données, tels que les enregistrements de défauts numériques, les données de synchrophaseurs, les relevés de compteurs, les données météorologiques, etc., et leurs combinaisons. L'analyse de grands ensembles de données structurées ou non structurées est nécessaire dans de nombreuses situations, comme l'analyse de la séquence des événements [35].

2.5.9 Résumé des domaines potentiels de P&C pour l'application de l'IA/ML

Le tableau 2-1 fournit quelques exemples de fonctions de protection et de fonctions connexes où l'application des techniques d'IA/ML pourrait être utile. Les appareils électroniques intelligents actuels (IED) emploient des fonctions de protection classiques pour accomplir bon nombre de ces fonctions avec un grand succès, mais il reste de la place pour des améliorations en termes de vitesse, de sensibilité, de fiabilité et d'adaptabilité, comme mentionné précédemment. D'autre part, les algorithmes classiques sont inadéquats ou trop complexes pour être appliqués en temps réel pour certaines fonctions telles que la prédiction et le contrôle de la stabilité du système, la détection d'îlots, l'îlotage contrôlé, la détection d'arcs, etc. Dans ces applications, l'IA/ML peut jouer un rôle crucial [35].

Tableau 2-2 : Domaines potentiels d'application de l'IA/ML [35]

Protections des actifs	Nom du signal
Détection des défauts à haute impédance	Surveillance et protection au niveau du système
Détection des défauts évolutive	Surveillance et protection de la stabilité de la tension
Sélectivité de la direction des défauts	Surveillance et protection de la stabilité transitoire
Identification des segments défectueux	Détection et protection des îlotages
Détection d’extinction d’arc secondaire	Protection de stabilité de fréquence
Protection adaptative	
Surveillance de l’état et diagnostic des défauts des transformateurs, réacteurs et condensateurs	
Détection de saturation CT, de transitoires VT et de conditions d’appel, ainsi qu’autosurveillance et diagnostic	
Commun à la protection des actifs et du réseau	

Traitement des diagnostics des alarmes
Optimisation des paramètres/coordination, paramètres adaptatifs et protection sans paramètre
Analyse des données de l'enregistreur numériques de défauts
Analyse des données de séquence d'événements
Détection et conditionnement des données erronées

2.5.10 L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la protection numérique ou numérique des relais pour la révolution de l'industrie de l'énergie électrique.

La capacité de l'IA à traiter et analyser de grands ensembles de données en temps réel a ouvert de nouvelles voies pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes de protection.

La révolution numérique a transformé la protection des systèmes électriques, avec des relais numériques remplaçant les systèmes électromécaniques traditionnels. Maintenant, l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) promet d'améliorer encore les capacités de ces dispositifs intelligents. Les algorithmes d'IA peuvent analyser de vastes quantités de données provenant des relais et des capteurs, ce qui permet une meilleure détection des défauts, une prise de décision plus rapide et des stratégies de maintenance proactive, contribuant finalement à un réseau plus fiable et résilient caractéristiques représentatives pour identifier le texte de manière prédictive plutôt que programmatique [35].

2.5.10.1 Amélioration de la protection numérique des relais par l'IA

L'IA offre plusieurs applications prometteuses dans le domaine de la protection numérique des relais :

2.5.10.1.1 Détection et classification améliorées des défauts :

Les algorithmes d'IA excellent dans la reconnaissance de motifs et la détection d'anomalies. En analysant les données historiques des défauts et les mesures en temps réel des relais, l'IA peut identifier des variations subtiles dans les formes d'onde de courant et de tension qui pourraient indiquer des défauts naissants. Cela permet une détection des défauts plus rapide et plus précise

par rapport aux schémas de protection traditionnels basés sur des règles. De plus, l'IA peut classer les types de défauts (par exemple, phase-phase, phase-terre) avec une plus grande précision, ce qui permet des stratégies de protection ciblées.

2.5.10.1.2 Prise de décision améliorée pendant les défauts :

Les relais de protection traditionnels reposent sur des réglages prédéfinis pour les décisions de déclenchement des défauts. L'IA peut analyser les conditions du système en temps réel, telles que les changements de topologie du réseau ou les charges fluctuantes, et ajuster dynamiquement les paramètres du relais pour garantir une protection optimale lors d'événements de défaut. Cette adaptation dynamique aide à minimiser les dommages aux équipements et à maintenir la stabilité du système, en particulier lors de scénarios de défauts complexes caractéristiques représentatives pour identifier le texte de manière prédictive plutôt que programmatique [35].

2.5.10.1.3 Maintenance prédictive des relais et des équipements associés :

La surveillance continue des données de santé des relais, combinée à des algorithmes d'IA, peut faciliter le passage d'une maintenance réactive à une maintenance prédictive. En analysant les tendances et en identifiant les problèmes potentiels dans le relais ou les équipements connectés (par exemple, transformateurs, disjoncteurs) avant qu'ils ne se transforment en pannes, l'IA peut aider les services publics à prioriser les activités de maintenance et à réduire les temps d'arrêt.

2.5.11 Détection des défauts améliorée par l'IA

2.5.11.1 Analyse en temps réel et précision

Les algorithmes d'IA peuvent analyser les paramètres électriques surveillés par les relais numériques, tels que le courant, la tension et la fréquence, avec une vitesse et une précision exceptionnelle. Cette analyse en temps réel permet de détecter précocement les anomalies qui pourraient indiquer des défauts potentiels, améliorant considérablement la précision de la détection des défauts par rapport aux méthodes traditionnelles caractéristiques représentatives pour identifier le texte de manière prédictive plutôt que programmatique [35].

2.5.11.2 Reconnaissance de motifs et détection d'anomalies

L'IA excelle dans l'identification de motifs dans les données. Dans la protection des relais numériques, les modèles d'apprentissage automatique peuvent être entraînés à reconnaître les signatures de différents types de défauts, permettant une détection précise des anomalies et réduisant les faux positifs ou négatifs, qui sont courants dans les systèmes de protection conventionnels caractéristiques représentatives pour identifier le texte de manière prédictive plutôt que programmatique [35].

2.5.12 Processus de prise de décision

2.5.12.1 Soutien à la décision automatisé

L'IA dans les relais numériques peut fournir un soutien à la décision automatisé, offrant des recommandations basées sur l'analyse complète des données du système. Cela aide les opérateurs à prendre rapidement des décisions éclairées, en particulier dans des situations complexes ou d'urgence où le temps est essentiel caractéristiques représentatives pour identifier le texte de manière prédictive plutôt que programmatique [35].

2.5.12.2 Réactivité accrue du système

Avec l'IA, les relais numériques peuvent prendre des décisions autonomes pour isoler les défauts de manière plus efficace, améliorant la réactivité du système. Cette capacité est cruciale pour prévenir l'escalade des défauts et réduire les dommages aux équipements et au réseau électrique caractéristiques représentatives pour identifier le texte de manière prédictive plutôt que programmatique [36].

2.5.13 Stratégies de maintenance prédictive

2.5.13.1 Analyse prédictive de la santé des équipements

Les stratégies de maintenance prédictive pilotées par l'IA utilisent l'analyse des données pour prédire les pannes d'équipement avant qu'elles ne se produisent. En surveillant continuellement l'état des actifs électriques, l'IA peut identifier les signes d'usure, permettant une maintenance proactive, prolongeant ainsi la durée de vie de l'équipement et réduisant les temps d'arrêt [36].

2.5.13.2 Réduction des coûts et optimisation des ressources

La mise en œuvre de l'IA dans la maintenance prédictive peut entraîner des économies de coûts significatives. En planifiant la maintenance en fonction de l'état réel de l'équipement plutôt que d'intervalles prédéfinis, les ressources sont utilisées de manière plus efficace, et les activités de maintenance inutiles sont réduites [36].

2.5.14 Considérations techniques et mise en œuvre

2.5.14.1 Intégration avec les systèmes existants

L'intégration de l'IA dans les systèmes de protection numérique des relais existants nécessite une planification minutieuse. La compatibilité avec le matériel, les logiciels et les protocoles de communication existants est cruciale pour garantir un fonctionnement et un flux de données fluides [36].

2.5.14.2 Qualité et gestion des données

L'efficacité de l'IA dans la protection numérique des relais dépend fortement de la qualité et de la quantité des données disponibles. Assurer une collecte de données précise et de haute qualité, ainsi que des pratiques efficaces de gestion des données, est essentiel pour former des modèles d'IA fiables [36].

2.5.14.3 Développement des compétences et formation de la main-d'œuvre

La mise en œuvre réussie de l'IA dans la protection numérique des relais nécessite une main-d'œuvre qualifiée capable de gérer et d'interpréter les systèmes d'IA. La formation continue et le développement des compétences sont essentiels pour équiper le personnel des connaissances et de l'expertise nécessaires [36].

2.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a offert un aperçu de la méthodologie de détection des défauts et de l'application de l'intelligence artificielle dans la protection numérique des relais. Cette approche représente une avancée majeure dans les technologies de protection électrique. Ce chapitre a offert un

aperçu de la méthodologie de détection des défauts ainsi que de l'application de l'intelligence artificielle dans la protection numérique des relais, marquant une avancée significative dans la technologie de protection électrique. Il a été démontré que l'intégration de l'IA améliore considérablement la détection des défauts, la prise de décision et la maintenance prédictive. Cela transforme le domaine de la protection des systèmes électriques en offrant des gains notables en termes d'efficacité, de fiabilité et de rentabilité.

Figure 3.1 : Réseau de distribution de SNEL/Goma [8]

La figure 3.2 illustre le schéma d'étude du réseau de distribution alimenté par le feeder Centre. Le schéma de configuration de ce réseau est illustré en annexe A.1.

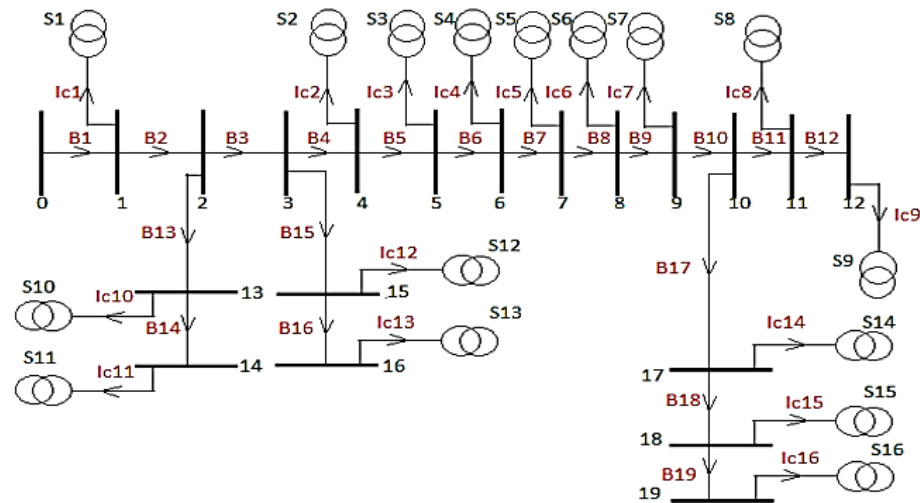


Figure 3.2 : Schéma Unifilaire du feeder Centre

Le feeder est composé de 19 nœuds regroupés de manière à former un réseau radial. Les données de chaque branche et la puissance installée pour ce feeder à chaque jeu de barre sont regroupées dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Illustration des données du feeder Centre

Numéro Jeu de Barre	Puissance Apparente Installée (KVA)	Numéro de Jeu de Barre aboutissant	Longueur de la branche de Liaison (m)
0	-	1	500
1	630	2	500
2	0	3	100
3	0	4	300
4	630	5	400
5	630	6	50
6	630	7	100

7	250	8	85
8	630	9	80
9	250	10	50
10	0	11	100
11	1150	12	50
12	315	-	-
2	0	13	30
13	100	14	40
14	400	-	-
3	0	15	20
15	630	16	25
16	400	-	-
10	0	17	40
17	630	18	45
18	630	19	500
19	630	20	500

3.3 RECOLTE DES DONNEES

Notre système de protection intelligente vise à identifier et détecter certains défauts pouvant survenir dans un réseau électrique. Dans ce travail, sept types de défauts seront prédits, à savoir :

- Le court-circuit triphasé (ABC)
- Les courts-circuits biphasés (AB, AC et BC),
- Les courts-circuits monophasés (AT, BT, CT).

En revanche, le défaut triphasé-terre et les défauts biphasés-terre ne seront pas pris en compte, car ils sont rares [37].

Pour collecter les données liées aux défauts, quatre simulations ont été effectuées successivement pour chaque type de défaut. Chaque simulation sous Matlab est exécutée sur

une durée de deux secondes ce qui nous permettra de requérir un peu plus de 2000 série de données, qui étant en quantité suffisante permettra à ce que les modèles conçus assurent :

- L'efficacité : Plus les modèles ont été entraînés sur un large dataset plus la généralisation des modèles sera optimale ce qui garantira son efficacité lors de la prédiction.
- Optimisation des ressources : la simulation en 2 secondes permet d'optimiser l'utilisation des ressources informatiques et de réduire le temps de calcul, ce qui est crucial pour notre système de protection en temps réel.
- Précision des résultats : Les données recueillies incluent différents types de scénarios pouvant survenir dans un réseau ainsi ayant développé des modèles généralisant parfaitement sur les données d'apprentissage, il apparaît clairement qu'il serait précis lors de test (Voir tableau 3.6).

Le logiciel MATLAB génère lors de la mesure d'une grandeur électrique le signal temporel y afférant, devant entraîner nos modèles sur les données numériques, il est aisé de passer du domaine temporel vers le domaine fréquentiel, ainsi l'on pourra recueillir aisément l'amplitude et la phase du signal. Pour satisfaire la condition évoquée tantôt, les données sont sous forme numérique obtenue après application de la transformée de Fourier en considérant une fondamentale de 50Hz et une fréquence d'échantillonnage de 1kHz au signal de ces différents grandeurs.

Avec les sept types de défauts et quatre simulations par type, cela génère un tableau de 56 000 valeurs, une simulation générant 2000 valeurs.

Il est important de souligner que, pour chaque type de défaut à prédire, les quatre simulations associées diffèrent par une variation aléatoire de la charge appliquée aux différents jeux de barres pour chaque simulation. La variation aléatoire des charges connectées aux jeux de barres du réseau permet de concevoir un système capable de s'adapter à toute variation des charges dans le réseau. Avec les fichiers obtenus pour chaque type de simulation on retrouve la base de données nécessaire à l'entraînement de notre système de protection.

3.4 ENTRAÎNEMENT DU MODÈLE

Les données ayant été collectées sous Matlab, une conversion en fichiers Excel est nécessaire afin de faciliter leur traitement ultérieur avec le langage de programmation Python. Tel que souligné précédemment, les fichiers MATLAB regroupent en tous 56000 données. Après un prétraitement visant à regrouper toutes les données dans un seul fichier Excel et à éliminer les données redondantes, nous obtenons un fichier contenant 47 863 enregistrements.

Après traitement, un tableau contenant 116 colonnes est obtenu. Le nombre des colonnes du tableau obtenu se base sur la structure du réseau. En effet le réseau est composé de 19 jeux de barres. Ainsi nous avons 19 données de tension et 19 données de courant ; étant donné que le système est triphasé, chaque jeu de barres génère trois valeurs pour la tension et trois pour le courant, cela donne un total de 114 colonnes (57 pour la tension et 57 pour le courant). À ces colonnes s'ajoutent deux autres dont une dédiée au numéro du jeu de barres et une autre indiquant le jeu de barres en défaut ; d'où un total de 116 colonnes.

La colonne représentant les jeux de barres en défaut contient des valeurs allant de 0 à 19, où 0 signifie qu'aucun jeu de barres n'est en défaut, et les chiffres allant de 1 à 19 correspondent aux numéros des jeux de barres en défaut. La colonne type de défauts, quant à elle, contient des valeurs allant de 0 à 7, où 0 indique l'absence de défaut. Et les types de défaut sont numérotés comme montré dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Types de défauts électriques et leurs codes

Types de défauts	Code associé
-	0
ABC	1
AB	2
AC	3
BC	4
AT	5
BT	6
CT	7

Deux modèles seront développés pour mettre en place notre système de protection intelligente. Le premier modèle sera chargé de prédire le type de défaut et le second modèle sera responsable de prédire le numéro du jeu de barres en défaut.

3.4.1 Méthode de bagging utilisant des arbres de décision

Pour réaliser les prédictions, deux modèles basés sur l'algorithme de machine learning *TreeBagger*, une variante du modèle *DecisionTree*, ont été implémentés [38]. Ces deux modèles sont choisis car les données issues d'un réseau électrique (tensions, courants, types de défauts, etc.) sont souvent complexes, non linéaires et bruitées. Les arbres de décision (et donc *TreeBagger*) sont capables de gérer des données de différentes natures (catégoriques et numériques) sans nécessiter de transformations complexes. De plus, les défauts dans un réseau électrique dépendent de relations non linéaires entre les paramètres électriques (tension, courant, impédance, etc.). *TreeBagger* excelle dans la modélisation de ces relations grâce à son approche d'ensemble basée sur plusieurs arbres [38].

La précision de la classification dépend de nombreux aspects. Deux des aspects les plus importants sont la sélection d'un algorithme de classification pour une tâche donnée et la sélection d'un ensemble d'entraînement [38]. Nous nous sommes concentrés sur des expériences avec des échantillons d'ensembles d'entraînement, dans le but d'améliorer la précision des résultats de classification.

À l'heure actuelle, deux approches différentes sont connues. La première approche est basée sur l'idée de créer différents échantillons de l'ensemble d'entraînement. Un classificateur est généré pour chacun de ces échantillons d'entraînement par un algorithme d'apprentissage automatique sélectionné. De cette manière, pour k variations de l'ensemble d'entraînement, nous obtenons k classificateurs particuliers. Le résultat sera donné comme une combinaison de classificateurs particuliers individuels. Cette méthode est appelée Bagging [38].

Le Bagging est une méthode pour améliorer les résultats des algorithmes de classification d'apprentissage automatique. Cette méthode a été formulée par Leo Breiman et son nom a été déduit de l'expression « bootstrap aggregating » [38].

Un objet TreeBagger est un ensemble d'arbres de décision (en anglais, decision tree) utilisé pour des tâches de classification ou de régression. Les arbres de décision classiques ont tendance à souffrir de surajustement (overfitting), ce qui peut affecter leurs performances. Le bagging (abréviation de Bootstrap Aggregating) permet de réduire cet effet de surajustement en combinant plusieurs arbres de décision, ce qui améliore ainsi la robustesse et les performances des modèles TreeBagger [39].

La méthode de bagging est un moyen approprié pour augmenter l'efficacité des algorithmes d'apprentissage automatique standard. Considérant la même efficacité pour un arbre de décision parfait et les classificateurs basés sur le bagging, le nombre minimum de classificateurs nécessaires pour atteindre cette efficacité peut être trouvé. En ce qui concerne les inconvénients du bagging, on peut observer la perte de simplicité et d'illustrativité de schéma de classification. Une complexité de calcul accrue est également un peu décourageante [38].

3.5 PRESENTATION DES RESULTATS

Après avoir collecté et traité les données, l'entraînement de deux modèles a été réalisé : l'un pour prédire le type de défaut et l'autre pour identifier le numéro du jeu de barres en défaut. Les codes sont illustrés en annexe B.1.

Les résultats obtenus sont tels qu'un modèle capable de prédire le type de défauts avec une précision de 98,4 % sur les données de test a été obtenu, de même, un modèle destiné à prédire le numéro du jeu de barres en défaut avec une précision de 95 % a été obtenu.

Une fois ces deux modèles obtenus, ils ont été intégrés sous forme de fonctions dans l'environnement Matlab Simulink, ce qui permet de réaliser des prédictions en temps réel des défauts pouvant survenir dans le réseau. L'implémentation sous MATLAB implique la simulation du réseau feeder Centre en considérant les données y afférant, incluant les lignes, les différents jeux de barre (au nombre de 19) et leurs charges, ainsi que le niveau de tension du réseau, fixé à 15 kV. Une fois le réseau implémenté, on ajoute au modèle les différents capteurs pour la mesure de la tension et du courant à chaque jeu de barre ces capteurs seront suivi d'un bloc effectuant la transformée de Fourier ce qui permettra de requérir les données

sous forme d'amplitude et de phase en format numérique. Pour simuler les défauts différents, simulateur de défaut sont implémentée aux jeux de barre tout en précisant l'instant d'apparition de leur défaut. Après la récolte des données et l'entraînement des modèles ils sont présentés sous forme de fonction dans l'environnement MATLAB il permettront en outre de prédire le type de défaut et le jeu de barre en défaut. La figure 3.3, illustre le modèle implémenté pour le feeder centre.

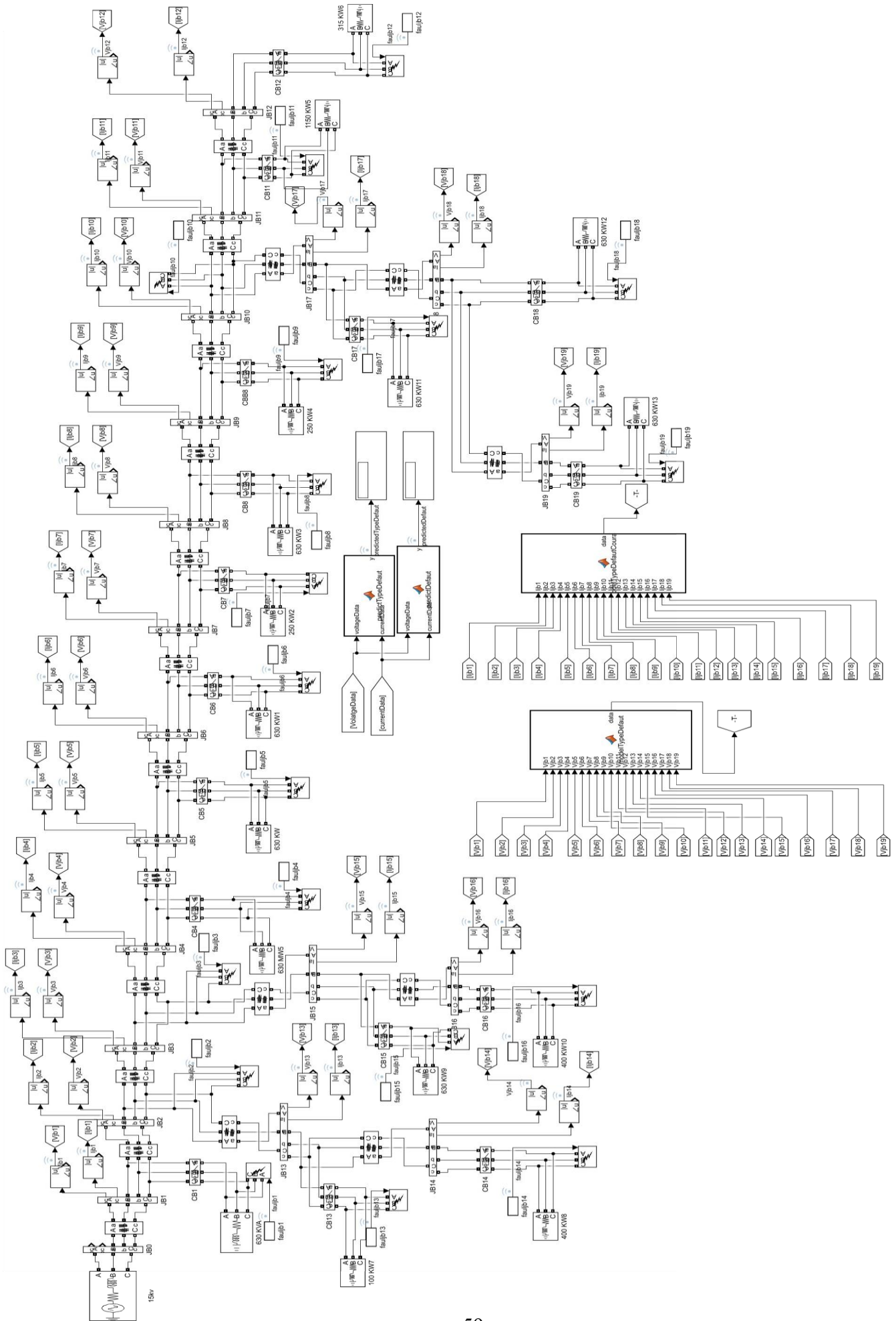


Figure 3.3 : Modèle implémenté pour le feeder centre.

Le tableau 3.3 illustre les résultats obtenus lors de la simulation en temps réel des défauts aux différents jeu de barre.

Tableau 3-3 : Illustration des résultats pour l'évaluation de la précision des modèles en temps réel.

Temps de simulation	Jeu de barre en défaut	Type de défaut/court-circuit	Jeu de barre prédit	Type de défaut prédit
[0.02, 0.08]	1	ABC	1	ABC
[0.2, 0.28]	2	AB	2	AB
[0.3, 0.38]	3	AT	3	AT
[0.4, 0.48]	4	AC	4	AC
[0.5, 0.58]	5	BC	5	BC
[0.6, 0.68]	6	BT	6	BT
[0.7, 0.78]	7	ABC	7	ABC
[0.8, 0.88]	8	AB	8	AB
[0.9, 0.98]	9	AC	9	AC
[1, 1.08]	10	AT	10	AT
[1.1, 1.18]	11	CT	11	CT
[1.2, 1.28]	12	BC	12	BC
[1.3, 1.38]	13	ABC	13	ABC
[1.4, 1.48]	14	BT	14	BT
[1.5, 1.58]	15	BC	15	BC
[1.6, 1.68]	16	AT	16	AT
[1.7, 1.78]	17	AC	17	AC
[1.8, 1.88]	18	ABC	18	ABC
[1.9, 1.98]	19	CT	19	CT

Les résultats obtenus au tableau 3.3 nous permettent d'affirmer que nos deux modèles sont capables de prédire avec précision les différents défauts pouvant subvenir dans un réseau électrique.

La figure 3.4 illustre les résultats de la matrice de confusion lors du test du modèle pour la prédiction du numéro du jeu de barre en défaut.

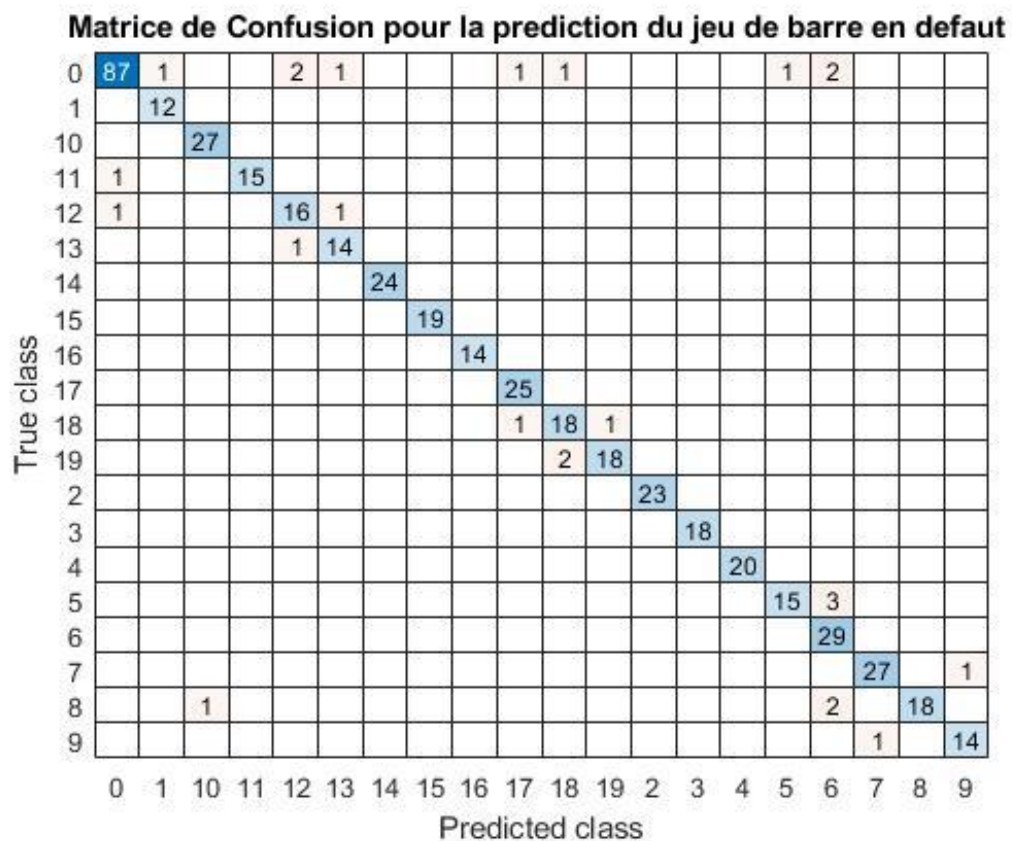


Figure 3.4 : Illustration de la matrice de confusion du modèle pour la prédiction du jeu de barre en défaut

La figure 3.4 nous renseigne que la plupart des défauts implémentée sur différents jeux de barre du feeder centre ont été prédit tels que spécifiée lors de leurs implémentations sous Matlab cela traduit la robustesse de notre modèle.

Le tableau 3.4 illustre l'ensemble de résultats obtenu sur les données de test du modèle servant à prédire le jeu de barre en défaut.

Tableau 3-4 : Résultats modèle prédiction jeu de barre en défaut

Classe	Rappel	Précision	F1-Score
0	0.9063	0.9770	0.9405
1	1	0.9979	0.9600
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	0.8333	0.9916	0.8824
6	1	0.9854	0.8923
7	0.9643	0.9958	0.9643
8	0.8571	0.9937	0.9231
9	0.9333	0.9958	0.9333
10	1	0.9979	0.9818
11	0.9063	0.9770	0.9405
12	1	0.9979	0.9600
13	1	1	1
14	1	1	1
15	1	1	1
16	0.8333	0.9916	0.8824
17	1	0.9854	0.8923
18	0.9643	0.9958	0.9643
19	0.8571	0.9937	0.9231

Les résultats du tableau 3.4 nous renseigne que le modèle implémenté pour la prédiction du jeu de barre en défaut est d'une précision moyenne de près de 96,85% sur les données de test et un F1-score moyen de 93,53%. Avec ces deux valeurs on affirme aisément que notre modèle est robuste afin de prédire le jeu de barre en défaut dans le réseau du feeder centre.

Le modèle étant précis, il est aussi impératif d'évaluer la rapidité de la détection du défaut. La figure 3.5 illustre la courbe montrant l'évolution de la sortie du modèle de prédiction du numéro du jeu de barre en défaut et l'évolution des défauts implémentée aux différents jeux de barre

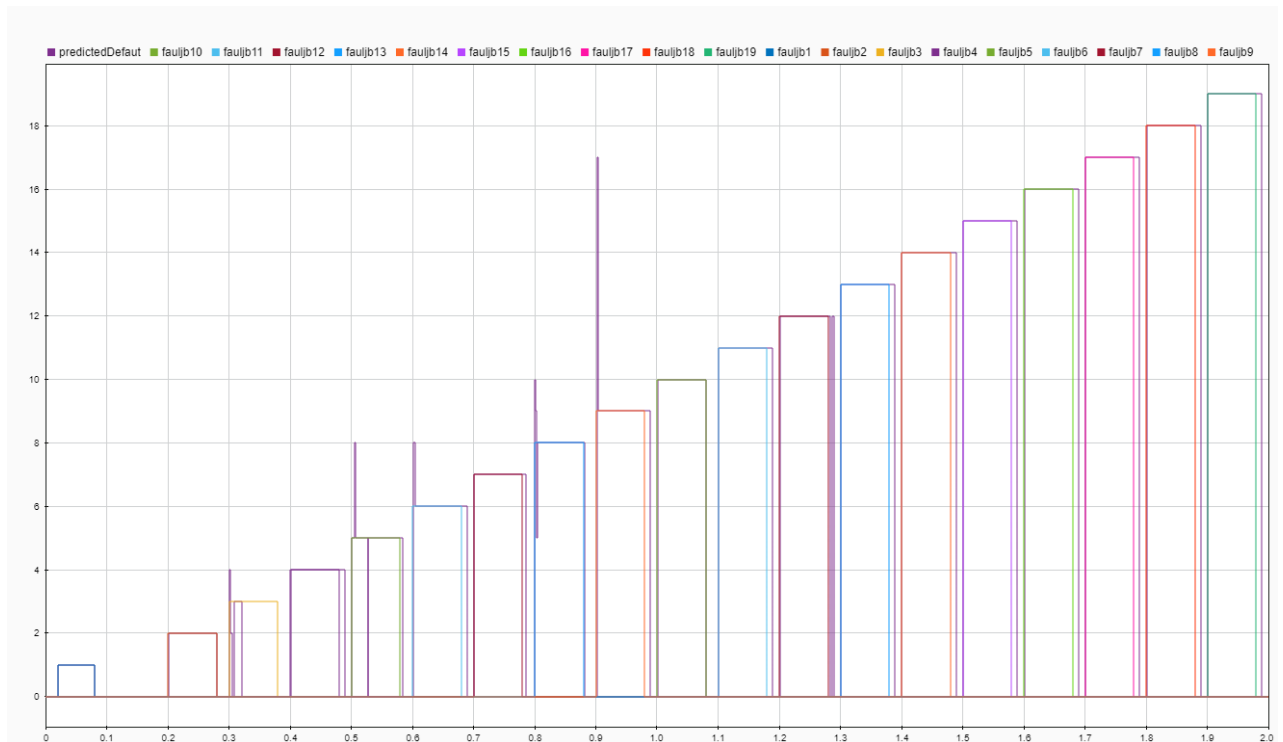


Figure 3.5 : Illustration de la rapidité de la détection du modèle

La figure 3.5 nous renseigne que notre modèle est capable de détecter le défaut sur un jeu de barre de façon presque instantanée, ce qui nous permet d'affirmer son efficacité en tant que protection. Pour écarter les défauts dans le réseau, le signal de sortie du modèle prédisant le numéro du jeu de barre est utilisé. En effet, en ayant le numéro du jeu de barre en défaut, une fonction Matlab basée sur des conditions peut être implémentée.

La figure 3.6 illustre les résultats de la matrice de confusion lors du test du modèle pour la prédiction du type de défaut dans le réseau du feeder Centre.

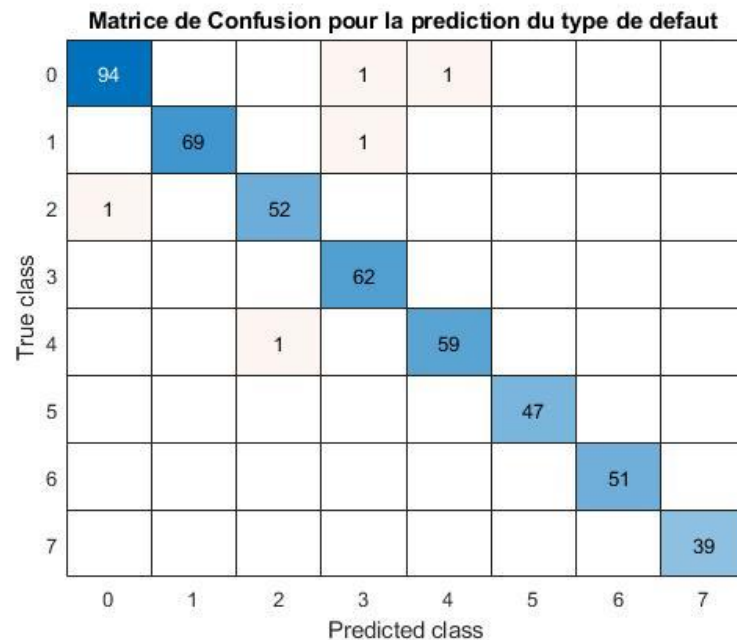


Figure 3.6 : Illustration de la matrice de confusion du modèle de prédiction du type de défaut

La figure 3.6 nous renseigne que la plupart des défauts implémentée sur différents jeux de barre du feeder centre ont était prédit conformément au type de défaut configurée lors de leurs implémentations. Le tableau 3.5 illustre l'ensemble de résultats obtenu sur les données de test du modèle servant à montrer le type de défaut.

Tableau 3-5 Résultats modèle prédiction jeu de barre en défaut

Classe	Recall	Précision	F1-Score
0	0.9792	0.9937	0.9843
1	0.9857	0.9979	0.9928
2	0.9811	0.9958	0.9811
3	1	0.9958	0.9841
4	0.9833	0.9958	0.9833
5	1	1	1
6	1	1	1

7	1	1	1
---	---	---	---

Les résultats du tableau 3.5 nous renseigne que le modèle implémenté pour la prédiction du type de défaut est d'une précision moyenne de près de 99.73% sur les données de test et un F1-score moyen de 99.07%. Avec ces deux valeurs on affirme aisément que notre modèle est robuste afin de prédire le type de défaut dans le réseau du feeder centre.

3.6 CONCLUSION PARTIELLE

Au cours de ce chapitre, le réseau du feeder centre a été présenté. Un système de protection basé sur deux modèles de type TreeBagger a été implémenté et simulé sous Matlab, l'un pour la prédiction du jeu de barres en défaut et l'autre pour la prédiction du type de défaut pouvant survenir dans le réseau. Les résultats ont montré que le modèle prédisant le jeu de barres en défaut a une précision moyenne de 96,85 %, tandis que celui prédisant le type de défaut atteint une précision de 99,73 %. Ainsi, nous affirmons qu'un modèle basé sur l'intelligence artificielle pour assurer la protection dans le réseau de distribution feeder centre de la SNEL/Goma a été implémenté et sa robustesse éprouvée. En bref l'intégration réussie des modèles prédictifs dans un système de protection intelligent représente une avancée significative pour la gestion des défauts dans les réseaux électriques. Les résultats obtenus montrent non seulement l'efficacité des modèles développés mais aussi leur potentiel à répondre aux défis contemporains liés à la sécurité électrique. Par conséquent, cette recherche ouvre des perspectives prometteuses pour l'amélioration continue des systèmes de protection dans le domaine électrique.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre travail sur le développement d'un système de protection intelligent contre les courts-circuits dans les tableaux électriques des réseaux de la ville de Goma, nous nous fixons comme objectif de concevoir et de mettre en place un système de protection performant et adapté aux différentes installations électriques, notamment le réseau de distribution moyenne tension de la SNEL/Goma.

Les principaux défis liés à la protection contre les courts-circuits dans les tableaux électriques des réseaux électriques actuels protection sont :

- La rapidité pour limiter la durée des courants de court-circuit ;
- La sélectivité pour ne déclencher que l'ouvrage siège du court-circuit ;
- La sensibilité pour fonctionner sur une large plage de courants de court-circuit ;
- La fiabilité car une protection n'est pas sollicitée fréquemment mais doit être disponible et ne pas engendrer de déclenchement intempestif.

Plusieurs technologies et méthodes sont utilisées pour détecter et prévenir les courts-circuits dans les tableaux électriques : Disjoncteurs, fusibles, relais de protection, contacteurs, ...

Pour développer un système de protection intelligent contre les courts-circuits, l'utilisation d'algorithmes avancés (les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle) ont été nécessaire.

La combinaison de technologies modernes avec des algorithmes avancés peut considérablement améliorer la détection et la réponse aux courts-circuits dans les réseaux électriques actuels.

Les questions suivantes ont guidé notre recherche :

1. Quels sont les principaux défis liés à la protection contre les courts-circuits dans les tableaux électriques des réseaux électriques actuels ?
2. Quelles sont les technologies et les méthodes existantes pour détecter et prévenir les courts-circuits dans les tableaux électriques ?
3. Comment peut-on développer un système de protection intelligent qui utilise des algorithmes avancés pour détecter et réagir rapidement aux courts-circuits, tout en

minimisant les risques de dommages aux équipements électriques et en assurant la sécurité des personnes ?

Pour concevoir et mettre en place un système de protection intelligent contre les courts-circuits, deux modèles d'intelligence artificiel basés sur le modèle TreeBagger ont été implémenté et entraîné sous le logiciel MATLAB.

De ces deux modèles l'un permet la prédiction du jeu de barre en défaut et l'autre pour la prédiction du type de défaut ; Ainsi deux objectifs principaux ont été atteints : la prédiction précise du type de défaut survenant dans le réseau, et l'identification du jeu de barres affecté. Les résultats obtenus lors de la simulation sous MATLAB/Simulink nous permettent d'affirmer que :

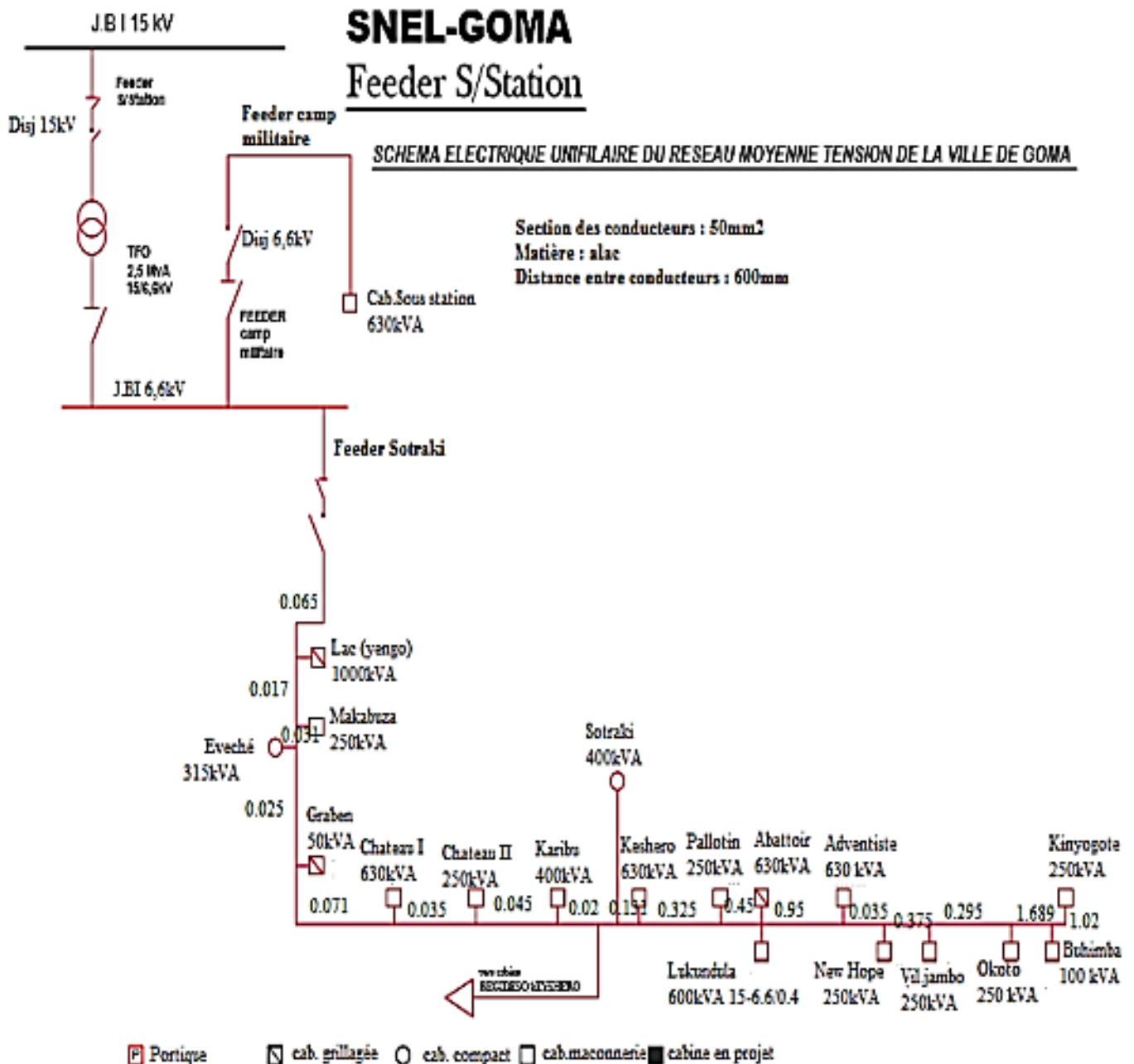
- Le modèle chargé de prédire le type de défaut est d'une précision moyenne de 99,73% et un F1-score moyen de 99,07 %. Ces résultats nous permettent d'affirmer que notre modèle est capable de distinguer les défauts pouvant subvenir aux différents jeux de barres du réseau feeder centre d'une manière précise, fidèle et robuste.
- Le modèle destiné à identifier le jeu de barres en défaut atteint une précision moyenne de 96,85 % et un F1-score de 93,53%.; aux vues de ces résultats on affirme que notre modèle est capable de détecter avec précision, fidélité et robustesse les différents défauts pouvant subvenir aux différents jeux de barres du feeder centre de la SNEL Goma.

Le système de protection développé dans ce travail est capable de détecter les défauts de manière quasi-instantanée, ce qui renforce son efficacité en tant que solution de protection en temps réel.

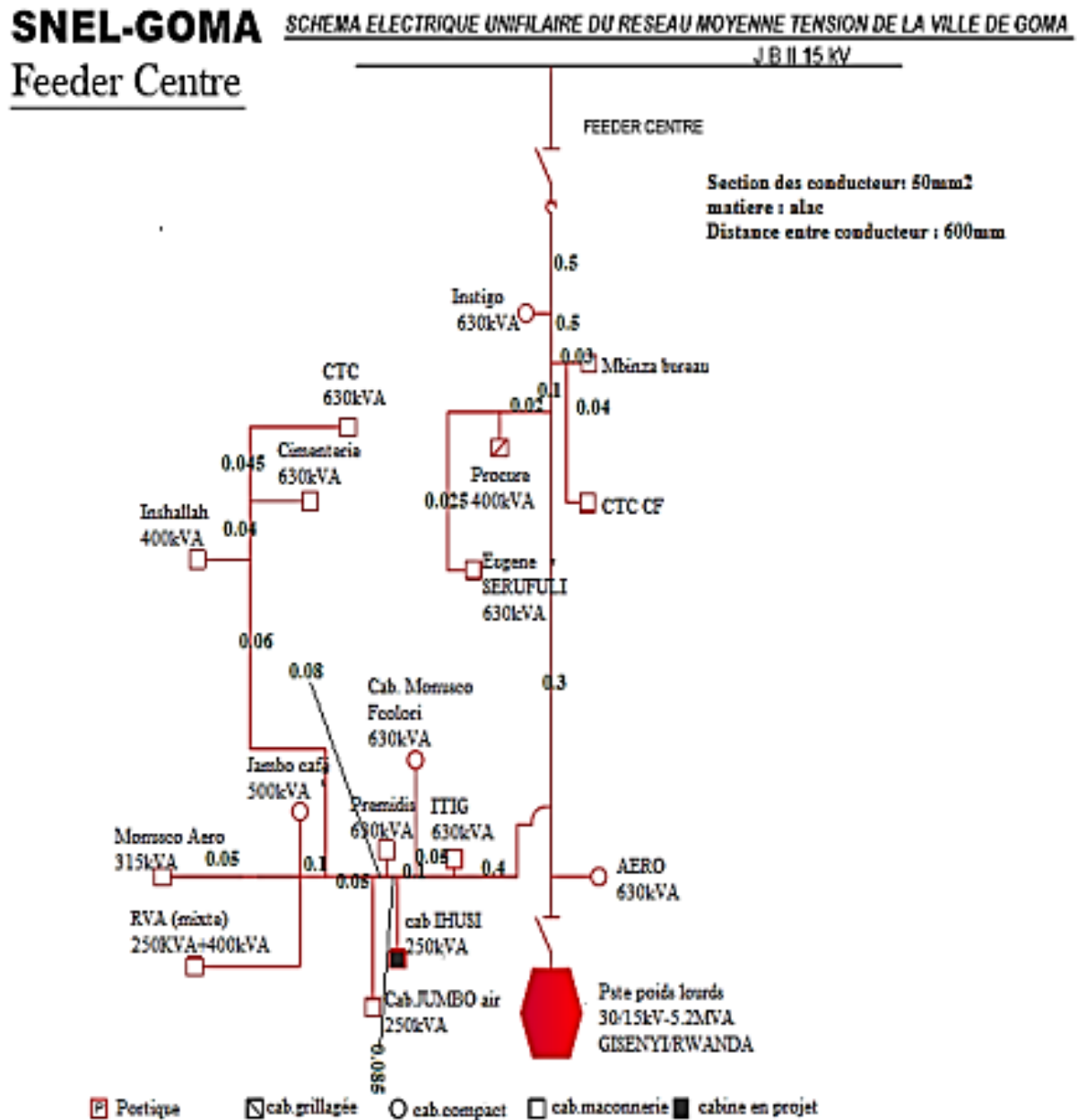
Pour compléter ce travail nous pouvons suggérer les approches suivantes :

- Développer un prototype physique à l'aide des microcontrôleurs tels que raspberryPI afin d'évaluer dans les conditions réelles la performance des modèles proposés ici pour la protection contre les défauts électriques
- Elaborer une étude technico économique sur l'intégration des systèmes basées sur l'intelligence artificielle pour la protection des réseaux électrique.

Annexe A



A.1 Schéma électrique unifilaire du réseau MT de la ville Goma



Annexe B

Algorithmes de protection

B.1 Prédiction du type de défaut et du numéro du jeu de barre en défaut

```
% charger le fichier CSV data
data = readtable('dataAllF.csv');
% prendre en entree le 114 premiere colonnes
X = data{:, 1:114};
y_typeDefault = data.TypeDefault; % Sortie pour le type de défaut
y_default = data.default; % Sortie pour le numero du JB en défaut
rng(1);
% Partitionner les données : 80 % pour la formation, 20 % pour les tests
cv = cvpartition(height(data), 'HoldOut', 0.01);
% Données d'entraînement et de test pour les fonctionnalités
X_train = X(training(cv), :);
X_test = X(test(cv), :);
% Données d'entraînement et de test pour typeDefault
y_train_typeDefault = y_typeDefault(training(cv));
y_test_typeDefault = y_typeDefault(test(cv));
% Données d'entraînement et de test pour défaut
y_train_default = y_default(training(cv));
y_test_default = y_default(test(cv));
% Entraîner le modèle Random Forest pour typeDefault
numTrees = 100;
rf_typeDefault = TreeBagger(numTrees, X_train, y_train_typeDefault, ...
    'Method', 'classification', 'OOBPrediction', 'On');
% Évaluer le modèle sur les données de test
pred_typeDefault = predict(rf_typeDefault, X_test);
```

```

pred_typeDefault = str2double(pred_typeDefault); % Conversion des prédictions en numériques
si nécessaire
accuracy_typeDefault = mean(pred_typeDefault == y_test_typeDefault);
% Afficher les résultats
fprintf('Accuracy for typeDefault model: %.2f%%\n', accuracy_typeDefault * 100);
% Entraîner le modèle de forêt aléatoire pour default
rf_default = TreeBagger(numTrees, X_train, y_train_default, ...
    'Method', 'classification', 'OOBPrediction', 'On');
% Évaluer le modèle sur les données de test
pred_default = predict(rf_default, X_test);
pred_default = str2double(pred_default); % Conversion des prédictions en numériques si
nécessaire
accuracy_default = mean(pred_default == y_test_default);
% Afficher les résultats
fprintf('Accuracy for default model: %.2f%%\n', accuracy_default * 100);
save('rf_typeDefault_model.mat', 'rf_typeDefault');
save('rf_default_model.mat', 'rf_default');

```

B.2 Fonction des données de chaque branche

```

function [linedata]=linedata_radial_bus(nbus)
linedataCentre=[
    1.0000  1.0000  2.0000  0.2820  0.1648
    2.0000  2.0000  3.0000  0.2820  0.1648
    3.0000  3.0000  4.0000  0.0564  0.0330
    4.0000  4.0000  5.0000  0.1692  0.0989
    5.0000  5.0000  6.0000  0.2256  0.1318
    6.0000  6.0000  7.0000  0.0282  0.0165
    7.0000  7.0000  8.0000  0.0564  0.0330

```

```

8.0000  8.0000  9.0000  0.0479  0.0280
9.0000  9.0000  10.0000  0.0451  0.0264
10.0000  10.0000  11.0000  0.0282  0.0165
11.0000  11.0000  12.0000  0.0564  0.0330
12.0000  12.0000  13.0000  0.0282  0.0165
13.0000  3.0000  14.0000  0.0169  0.0099
14.0000  14.0000  15.0000  0.0226  0.0132
15.0000  4.0000  16.0000  0.0113  0.0066
16.0000  16.0000  17.0000  0.0141  0.0082
17.0000  11.0000  18.0000  0.0338  0.0198
18.0000  18.0000  19.0000  0.0226  0.0132
19.0000  19.0000  20.0000  0.0254  0.0148
];
linedata=linedataCentre;
elseif(nbus==3)
end

```

B.3 Code MATLAB pour transformer les fichier MATLAB en fichier Excel

```

function []= transformFileToExcel(file)
    clc;
    file = load(file);
    fileValue = file.logout;
    for i= 1:fileValue.numElements
        name =fileValue{i}.Name;
        file = timetable2table(fileValue{i}.Values);
        %name = strcat(name,'.xls');
        writetable(file,strcat(name,'.csv'),'Delimiter',' ','QuoteStrings',true);
    end
end

```

B.4 Code de preprocessing python pour combiner les différents les fichier Excel en un seul fichier Excel

```
import numpy as np
import pandas as pd
def createDataFile (namesFile):
    voltageData = pd.DataFrame()
    currentData = pd.DataFrame()
    defaultData = pd.DataFrame()
    for name in namesFile:
        ## read voltage values
        fileName = name + ".csv"
        if(name[0]=="V"):
            voltage = pd.read_csv(fileName,on_bad_lines='skip',sep=',',decimal='.')
            index1 = "Time"
            index2 = name+"A"
            index3 = name+"B"
            index4 = name+"C"
            voltage.columns =[index1,index2,index3,index4]
            voltageData = pd.concat([voltageData, voltage], axis=1)
        elif (name[0]=="I"):
            current = pd.read_csv(fileName,on_bad_lines='skip',sep=',',decimal='.')
            index1 = "Time"
            index2 = name+"A"
            index3 = name+"B"
            index4 = name+"C"
            current.columns =[index1,index2,index3,index4]
            currentData = pd.concat([currentData, current], axis=1)
        else:
            default = pd.read_csv(fileName,on_bad_lines='skip',sep=',',decimal='.')
```

```

index1 = "Time"
index2 = name
default.columns =[index1,index2]
defaultData = pd.concat([defaultData, default], axis=1)

#print(voltageData.info())
#print(currentData.info())
#print(defaultData.info())
final = pd.concat([voltageData,currentData,defaultData],axis=1)
return final

fileNames
=["Vjb1","Ijb1","fauljb1","Vjb2","Ijb2","fauljb2","Vjb3","Ijb3","fauljb3","Vjb4","Ijb4","fauljb4","Vjb5","Ijb5","fauljb5","Vjb6","Ijb6","fauljb6","Vjb7","Ijb7","fauljb7","Vjb8","Ijb8","fauljb8","Vjb9","Ijb9","fauljb9","Vjb10","Ijb10","fauljb10","Vjb11","Ijb11","fauljb11","Vjb12","Ijb12","fauljb12","Vjb13","Ijb13","fauljb13","Vjb14","Ijb14","fauljb14","Vjb15","Ijb15","fauljb15","Vjb16","Ijb16","fauljb16","Vjb17","Ijb17","fauljb17","Vjb18","Ijb18","fauljb18","Vjb19","Ijb19","fauljb19"]

dataFile =createDataFile(fileNames)

combinaison des fichiers

# Load the data
data_4=pd.read_csv("data_4.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
data_1 =pd.read_csv("data_1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
data_2 =pd.read_csv("data_2.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
data_3 =pd.read_csv("data_3.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")

frames = [data_1,data_2,data_3,data_4]
dataF = pd.concat(frames)

```

B.5 Code de preprocessing python pour combiner les différents les fichier Excel pour un même type de défaut en un seul fichier Excel

```
gguy import numpy as np
import pandas as pd

chargement des fichiers des donnees

defaultDataThreePhase =
pd.read_csv("defaultThreePhaseABCV1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
defaultPhaseAGround =
pd.read_csv("defaultPhaseGroundAV1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
defaultPhaseBGround =
pd.read_csv("defaultPhaseGroundBV1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
defaultPhaseCGround =
pd.read_csv("defaultPhaseGroundCV1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
defaultPhaseAB =
pd.read_csv("defaultBiphaseABV1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
defaultPhaseBC =
pd.read_csv("defaultBiphaseBCV1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")
defaultPhaseAC =
pd.read_csv("defaultBiphaseACV1.csv",on_bad_lines="skip",sep=',',decimal=".")

traitement des donnees

## le type de défaut 1 correspond aux défaut triphase
defaultDataThreePhase['TypeDefault'].unique()
array([0, 1], dtype=int64)

## Changer les lignes qui n'ont aucun défaut en TypeDefault =0
defaultDataThreePhase.loc[defaultDataThreePhase['default'] == 0, 'TypeDefault'] = 0
defaultDataThreePhase['TypeDefault'].unique()
array([0, 1], dtype=int64)
defaultDataThreePhase.head()
```

```

## le type de défaut 5 correspond aux défaut phase A mise a la terre
defaultPhaseAGround['TypeDefaut'].unique()
array([0, 5], dtype=int64)

## Changer les lignes qui n'ont aucun défaut en TypeDefaut =0
defaultPhaseAGround.loc[defaultPhaseAGround['defaut'] == 0, 'TypeDefaut'] = 0
defaultPhaseAGround['TypeDefaut'].unique()
array([0, 5], dtype=int64)

## le type de défaut 6 correspond aux défaut phase B mise a la terre
defaultPhaseBGround['TypeDefaut'].unique()
array([0, 6], dtype=int64)

## Changer les lignes qui n'ont aucun défaut en TypeDefaut =0
defaultPhaseBGround.loc[defaultPhaseBGround['defaut'] == 0, 'TypeDefaut'] = 0
defaultPhaseBGround['TypeDefaut'].unique()
array([0, 6], dtype=int64)

## le type de défaut 7 correspond aux défaut phase C mise a la terre
defaultPhaseCGround['TypeDefaut'].unique()
array([0, 7], dtype=int64)

## Changer les lignes qui n'ont aucun défaut en TypeDefaut =0
defaultPhaseCGround.loc[defaultPhaseCGround['defaut'] == 0, 'TypeDefaut'] = 0
defaultPhaseCGround['TypeDefaut'].unique()
array([0, 7], dtype=int64)

## le type de défaut 3 correspond aux défaut phase AC court circuited
defaultPhaseAC['TypeDefaut'].unique()
array([0, 3], dtype=int64)

## Changer les lignes qui n'ont aucun défaut en TypeDefaut =0
defaultPhaseAC.loc[defaultPhaseAC['defaut'] == 0, 'TypeDefaut'] = 0
defaultPhaseAC['TypeDefaut'].unique()
array([0, 3], dtype=int64)

```

le type de défaut 2 correspond aux défaut phase AB court circuité

```
defaultPhaseAB['TypeDefaut'].unique()
```

```
array([0, 2], dtype=int64)
```

Changer les lignes qui n'ont aucun défaut en TypeDefaut =0

```
defaultPhaseAB.loc[defaultPhaseAB['defaut'] == 0, 'TypeDefaut'] = 0
```

```
defaultPhaseAB['TypeDefaut'].unique()
```

```
array([0, 2], dtype=int64)
```

le type de défaut 4 correspond aux défaut phase BC court circuité

```
defaultPhaseBC['TypeDefaut'].unique()
```

```
array([0, 4], dtype=int64)
```

Changer les lignes qui n'ont aucun défaut en TypeDefaut =0

```
defaultPhaseBC.loc[defaultPhaseBC['defaut'] == 0, 'TypeDefaut'] = 0
```

```
defaultPhaseBC['TypeDefaut'].unique()
```

```
array([0, 4], dtype=int64)
```

Combinaison des fichiers en un seul fichier

```
frames =
```

```
[defaultDataThreePhase,defaultPhaseAB,defaultPhaseAC,defaultPhaseBC,defaultPhaseAGround  
,defaultPhaseBGround,defaultPhaseCGround]
```

```
data = pd.concat(frames)
```

Bibliographie

- [1] Y. Jiang, Design and Implementation of Combined Electrical Fire Detector Based on NB-IoT and Single Chip Microcomputer, Fire science and, 2020.
- [2] X. C. Zhong, Design of Automatic Protection Circuit Breaker for Electrical Fire., Scientific and technological wind, 2012.
- [3] «materielelectrique.com,» [En ligne]. Available: <https://blog.materielelectrique.com/difference-disjoncteur-fusible/>. [Accès le 29 Mai 2024].
- [4] «actualite.cd,» [En ligne]. Available: <https://actualite.cd/2021/06/01/rdc-goma-necessite-dinterconnecter-les-services-de-differents-operateurs-du-secteur-de>. [Accès le 29 Mai 2024].
- [5] Schneider Electric, Protection des réseaux électriques, Guide de la protection, France, 2008.
- [6] «Noark,» [En ligne]. Available: <https://na.noark-electric.com/fr/blog/serie-nominale-vs-nominale-totale-2/>. [Accès le 29 Mai 2024].
- [7] «tutoriels.edu.lat,» [En ligne]. Available: <https://tutoriels.edu.lat/pub/electrical-safety/electrical-safety-short-circuit-protection/securite-electrique-protection-contre-les-courts-circuits>. [Accès le 29 Mai 2014].
- [8] G. MWENDERWA, OPTIMISATION DE L'INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES POUR LA REDUCTION DES PERTES ACTIVES DANS UN RESEAU DE DISTRIBUTION MT : CAS DE LA SNEL/GOMA, Goma, 2023-2024.
- [9] N. Tleis, Power systems modelling and fault analysis : theory and practice, Amsterdam: Elsevier/Newnes , 2008.
- [10] O. RICHARDOT, Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée, Thèse de doctorat INPG, 2000.

- [11] «Bac STI 2D,» [En ligne]. Available: https://sti2d.ecolelamache.org/b_les_reseaux_electriques.html. [Accès le 13 Aout 2024].
- [12] J. LILIEN, Transport et Distribution de l'Énergie Électrique, Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore Université de Liège , 2006.
- [13] B. M. Weedy, Electric Power Systems, 3rd éd., London: John Wiley & Sons Ltd, 1979.
- [14] THE SPECIALIST IN MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEA, DF-2 : TABLEAU MOYENNE TENSION LE CONCEPT MODULAIRE, SwitchGear Company nv, 2011.
- [15] Switchgearcompany, «AIS de haute qualité - appareillage de coupure isolé par air: DF-2».
- [16] EKOSelectric, «Tableaux Moyenne Tension (MT)».
- [17] umvie, «Comment choisir un jeu de barre pour tableau électrique : guide complet,» 6 avril 2024.
- [18] Izi-by-edf, «Interrupteur sectionneur : définition, rôle et branchement».
- [19] Joyelectric, «Comment fonctionne un sectionneur de mise à la terre,» 03 Juillet 2024.
- [20] Electricity-magnetism, «Fusible moyenne tension».
- [21] CR Technology system, «Appareillages électriques : DISJONCTEUR MT POUR APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE,» *Engineering talks*.
- [22] Dr. FEKIR Djamel-Eddine, Polycopié Cours UEM2.2 - ELTM-R221 : Appareillages et schémas électriques, Oran: ESG2E, 2019/2020.
- [23] G. L. BOUHA ABDELKADER, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme De Master : Protection et contrôle des réseaux électriques à bases des techniques d'intelligence artificielle, 2021-2022 .
- [24] R. ALILOUCH, Mémoire de Master : Détection, classification et localisation des défauts dans les lignes de transmission par les réseaux de neurones artificiels, Québec: Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), 2022.

- [25] Y. Dash, An Overview of Transmission Line Protection by Artificial Neural Network: Fault Detection, Fault Classification, Fault Location, and Fault Direction Discrimination," Advances in Artificial Neural Systems, 2014.
- [26] R. S. Moslemi, "Effect of two-circuit lines on unbalanced distribution systems" 16th Electrical Power Distribution Conference, 2011.
- [27] H. Kunlun, "Study on protective performance of HVDC transmission line protection with different types of line fault, 7/1/2011.
- [28] I. Murari Mohan Saha, Fault Location on Power Networks (Power Systems), Springer, 2010.
- [29] N. Tleis, Power systems modelling and fault analysis : theory and practice,, Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2008.
- [30] A. Mohamed, surveillance et diagnostic d'une ligne de protection par les réseaux de neurones artificiels, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister, 06/04/2010..
- [31] C. Touzet, « Les Réseaux de neurones artificiels, Introduction au connexionnisme cours, exercices et travaux pratiques, 1992, p. 6.
- [32] F. &. MEHIMDA, Mémoire de Master : Détection et classification des défauts de courts-circuits dans une ligne tht par les reseaux de neurones artificiels, Alger, 2017/2018.
- [33] M. Joaquim, COURS D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA), Goma: ULPGL, 2023/2024.
- [34] V. D. Aleksandr Petrushev, L'intelligence artificielle pour la gestion des réseaux de distrubtion, La Revue de l'électricité et de l'électronique, hal-03720550, 2022.
- [35] PacWorld, «Practical applications ofartificial intelligence machine learning in power system protection and control».
- [36] Intelligent power today.

- [37] «123dok,» [En ligne]. Available: <https://123dok.net/article/m%C3%A9thode-pratique-m%C3%A9thodes-localisation-d%C3%A9fautes.qmjekoe4>. [Accès le 19 Décembre 2024].
- [38] F. B. P. B. Kristína Machová, «A Bagging Method using Decision Trees in the Role of Base Classifiers,» Novembre 2006.
- [39] R. E. SCHAPIRE, «Machine Learning, Improved Boosting Algorithms Using Confidence-rated Predictions,» p. 297–336 , 1999.
- [40] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].
- [41] «Bing,» [En ligne]. Available: <https://www.bing.com/search?q=Bing%2BAI&FORM=ANWSB5&PC=U531&showconv=1>. [Accès le 5 Mai 20024].
- [42] «Wikipedia,» [En ligne]. Available: <fr.m.wikipedia.com>.
- [43] «Choisir.com,» [En ligne]. Available: <https://www.choisir.com/energie/articles/122264/le-court-circuit-quels-sont-les-risques-et-comment-sen-proteger>. [Accès le 2024 Mai 5].
- [44] physique-chimie-college.fr. [En ligne]. Available: <https://physique-chimie-college.fr/definitions-fiches-science/court-circuit/>. [Accès le 5 Mai 2024].
- [45] P. Jauffret, Introduction aux Réseaux de Neurones, Montpellier: Laboratoire des Systèmes d'Information Chimique UMR 5076 du CNRS, p. 3.
- [46] Schneider Electric.
- [47] B. d. METZ-NOBLAT, Cahier technique n° 158 : Calcul des courants de court-circuit, Schneider Electric, 2005.
- [48] S. Ekici, "A transmission line fault locator based on Elman recurrent networks," Applied Soft Computing, 2009/01/01, pp. 341-347.
- [49] F. Thierry, Installer un tableau électrique, Paris: Eyrolles, 2004.
- [50] V. Vapnik, "An overview of statistical learning theory," IEEE Transactions on Neural Networks, 1999.

