

E. N. S. T

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا
Ecole Nationale Supérieure de Technologie
The National Higher School of Technology

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Ecole Nationale Supérieure de Technologie
Département de Génie Industriel et Maintenance

Mémoire pour l'obtention du **diplôme de Ingénieur d'Etat 2^{ème} cycle**
Spécialité : MANAGEMENT ET INGENIERIE DE LA
MAINTENANCE INDUSTRIELLE

- **Thème** -

**Application de l'apprentissage automatique supervisé
dans la surveillance des systèmes de conversion
d'énergie.**

Réalisé Par :

-DJILALI BENFREDJ Karim.

-BENAMAR Rafik.

Soutenue publiquement, le 26/06/2023, devant le jury composé de :

M. HOUARI Fouad	MCA	à ENST	Président
M. MERADI Samir	MCA	à ENST	promoteur
M. MEDDOUR Ikhlas	MCA	à ENST	Examinateur

2022/2023

Dédicace

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude envers **ALLAH** le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force nécessaire afin d'accomplir ce travail de manière satisfaisante.

L'une des plus belles réalisations de la vie consiste à partager notre réussite avec les personnes que nous aimons.

Nous souhaitons dédier chaleureusement ce modeste travail à :

- Nos parents, qui ont toujours été présents à nos côtés.
- Nos très chères mamans, dont les sacrifices, les efforts et le soutien infaillibles méritent toute notre reconnaissance. Nous leur souhaitons une excellente santé et prions pour qu'Allah les préserve.
- Nos chers papas, pour leurs efforts constants, leurs conseils avisés et leur soutien inébranlable tout au long de nos années d'études.
- À tous nos camarades et amis, avec lesquels nous avons partagé des moments inoubliables.

DJILALI BENFREDJ Karim.

BENAMAR Rafik.

Remerciement

Nous exprimons notre sincère gratitude à **ALLAH**, l'Infiniment Puissant et Miséricordieux, pour nous avoir éclairés sur des connaissances inconnues et pour nous avoir accordé la santé ainsi que tout ce dont nous avons besoin pour mener à bien ce mémoire.

Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur **S. MEREDI**, Maître de Conférences à l'ENST, pour son encadrement lors de cette recherche. Nous remercions chaleureusement les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous adressons un merci spécial à nos parents pour leur soutien indéfectible tout au long de ces années d'études ardues.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide, de près ou de loin, tout au long de notre parcours académique.

Enfin, nous ne saurions conclure sans exprimer notre profonde gratitude envers tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours éducatif.

ملخص

تشمل التحديات الحالية التي تواجه صناعة تحويل الطاقة الكشف عن الأعطال وتصنيفها مثل الدوائر القصيرة ، وفي هذه الدراسة تم اقتراح نهج جديد يعتمد على الذكاء الاصطناعي وخلايا الخلايا العصبية الشبكية لحل هذه المشكلات. قمنا بتدريب نموذجنا باستخدام تقنية الشبكة العصبية الاصطناعية ثم اختبارها على مجموعة بيانات وحصلنا على نتائج جيدة من حيث اكتشاف الأخطاء وتصنيفها ، ويتم تقييم أداء النموذج واختباره باستخدام برنامج ماتلاب.

الكلمات المفتاحية: الشبكات العصبية الاصطناعية ، نظام تحويل الطاقة ، التشخيص.

Abstract

The current challenges faced by the energy conversion industry include the detection and classification of faults, such as short circuits. In this study, an innovative approach based on artificial intelligence and neural networks has been proposed to address these issues. We trained our model using artificial neural network (ANN) technology and subsequently tested it on a dataset, achieving good results in terms of fault detection and classification. The model's performance is evaluated and tested using Matlab (Simulink).

Keywords: Artificial neural networks (ANN), energy conversion system, diagnostics.

Résumé

Les défis actuels auxquels l'industrie de la conversion d'énergie est confrontée incluent la détection et la classification des défauts, tels que les court-circuits. Dans le cadre de cette étude, une approche novatrice reposant sur l'intelligence artificielle et les réseaux neuronaux a été proposée pour résoudre ces problèmes. Nous avons entraîné notre modèle à l'aide de la technologie des réseaux de neurones artificiels (RNA) et l'avons ensuite testé sur un ensemble de données, obtenant ainsi de bons résultats en termes de détection et de classification des défauts. Les performances du modèle sont évaluées et testées à l'aide de Matlab (Simulink).

Mots Clée : réseaux de neurones Artificiel (RNA), système de conversion d'énergie , diagnostic .

Table des matières

Table des figures	i
Liste des tableaux	iv
Introduction Générale	1
1 Etat de l'art	3
1.1 Introduction	4
1.2 Sources d'énergie	4
1.2.1 Les sources d'énergie renouvelables	4
1.2.2 Les sources d'énergie non-renouvelables	5
1.3 Les différents types de systèmes de conversion d'énergie	5
1.4 Principe de fonctionnement des systèmes de conversion d'énergie	7
1.5 Caractéristiques des systèmes de conversion d'énergie	8
1.6 Généralité sur transformateur de puissance	9
1.6.1 Définition	9
1.6.2 Constitution	9
1.6.3 Principe de fonctionnement	14
1.6.4 Caractéristique d'un transformateur de puissance	16
1.6.5 Défauts affectant les transformateurs	17
1.6.6 Protection des transformateurs	17
1.6.7 Maintenance des transformateurs	20
1.7 Conclusion	21
2 Modélisation d'un transformateur de puissance	22
2.1 Introduction	23
2.2 Représentation schématique du transformateur de puissance	23
2.2.1 Essai à vide	24
2.2.2 L'essai en court-circuit	27

2.3	Description du transformateur à modéliser	30
2.3.1	Application numérique	31
2.4	Modélisation sur Matlab	32
2.4.1	Modèle de simulation du transformateur en état sain	32
2.4.2	Modèle a vide	33
2.4.3	Modèle en court-circuit	36
2.5	Conclusion	37
3	Diagnostic des Défaits d'un Système de conversion d'énergie par l'Intelligence Artificielle	38
3.1	Introduction	39
3.2	Réseaux neuronaux : définitions et propriétés	39
3.2.1	Neurone biologique	39
3.2.2	Neurone formel	40
3.2.3	Création d'un système neuronal	40
3.2.4	Apprentissage des réseaux de neurones	42
3.2.5	Application au diagnostic	42
3.3	Présentation du système de conversion d'énergie étudié	43
3.4	Modélisation du système sur Matlab	43
3.5	Description des composants utilisés	44
3.5.1	Générateur	44
3.5.2	Transformateur de puissance triphasé	45
3.5.3	Charge électrique	46
3.6	Utilisation des réseaux de neurones artificiels dans les systèmes de conversion d'énergie pour la détection et la classification des défauts de court-circuit	46
3.6.1	Description de la base de données	48
3.6.2	Construction de RNA pour le détection et classification de défaut court-circuit sur système de conversion d'énergie	51
3.6.3	Architecture de RNA utilisée	52
3.6.4	Evaluation des performances	53
3.6.5	Évaluation et interprétation des résultats de tests	55
3.6.6	Test le modèle sur Matlab (Simulink)	60
3.7	Conclusion	63
	Conclusion Générale	64
	Bibliographie	66

A Interface graphique

A

Table des figures

1.1	Source d'énergie renouvelable	5
1.2	Source d'énergie non renouvelable	5
1.3	Diagramme énergétique	7
1.4	Principe de fonctionnement d'une centrale électrique	8
1.5	Circuit magnétique d'un transformateur	10
1.6	Enroulement d'un transformateur	10
1.7	transformateur vue extérieure	11
1.8	Traversées d'un transformateur de puissance	12
1.9	changeur de prise en charge	12
1.10	radiateur et ventilateur	13
1.11	Schéma de principe d'un transformateur triphasé	14
1.12	couplage du transformateur triphasé	15
1.13	Relais Buchholz d'un transformateur	18
1.14	Soupape de surpression	19
2.1	Le schéma électrique équivaut du transformateur de puissance	23
2.2	schéma équivalent du transformateur à vide	24
2.3	Diagramme vectoriel de transformateur à vide	25
2.4	Diagramme vectoriel de transformateur en court-circuit	28
2.5	plaque signalétique du transformateur utilisé	30
2.6	Modèle de simulation du transformateur en état sain	32
2.7	Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur	32
2.8	la puissance active de l'entrée du transformateur	33
2.9	Modèle du transformateur à vide et les différents blocs pour la simulation	34
2.10	Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur à vide	35
2.11	la puissance active de l'entrée du transformateur en circuit ouvert	35
2.12	Modèle du transformateur triphasé en court-circuit	36

2.13	Représentation temporelle des tensions et des courants à l'entrée du transformateur en court-circuit	36
2.14	la puissance active en court-circuit à l'entrée du transformateur	37
3.1	Exemple d'un neurone biologique	39
3.2	Modèle d'un neurone formel	40
3.3	modélisation sur Matlab (sumilink).	43
3.4	Paramètres du générateur utilisés	44
3.5	Paramètres du transformateur utilisés	45
3.6	Paramètres de la charge utilisés	46
3.7	Modèle avec défaut de court-circuit	47
3.8	Modèle finale de détection et classification	50
3.9	Architecture du réseau neuronal artificiel.	51
3.10	architecture de RNA pour la détection des défauts C-C	52
3.11	architecture de RNA pour la calssification des défauts C-C	53
3.12	matrice de confusion	54
3.13	performance de RNA	55
3.14	Les matrices de confusion	56
3.15	matrice de confusion du test	57
3.16	performance de RNA défaut 1	58
3.17	performance de RNA défaut 2	58
3.18	matrice de confusion de test la classification (défaut 1).	59
3.19	matrice de confusion de test la classification (défaut 2).	59
3.20	résultat de simulation de modèle Matlab	60
3.21	résultat de simulation de modèle défaut (AC).	61
3.22	résultat de simulation de modèle Matlab	62
3.23	résultat de simulation de modèle Matlab défaut (AB).	62
A.1	Interface graphique développé sur MATLAB.	B
A.2	: modélisation de système étudié avec matlab (simulink)	C
A.3	: Paramètre de la source dans l'interface.	C
A.4	: Paramètre du transformateur dans l'interface.	D
A.5	: Paramètre de la charge dans l'interface.	D
A.6	: détection et classification	E
A.7	: Paramètre de RNA utilisé.	E
A.8	: détection et classification le défaut de court-circuit dans l'interface.	F
A.9	: La surveillance sous l'interface graphique en état sain.	G

A.10	: La surveillance sous l'interface graphique en défaut AC.	H
A.11	: La surveillance sous l'interface graphique en défaut ACG	H
A.12	: La surveillance sous l'interface graphique en défaut AB.	I
A.13	: La surveillance sous l'interface graphique en cas des donnés erronés.	I
A.14	: : contact de l'éditeur de l'interface graphique.	J

Liste des tableaux

1.1	Défauts liée au transformateur	17
3.1	Classification des défauts avec les sorties.	49

Introduction Générale

Les systèmes de conversion d'énergie, jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des entreprises. Ils sont conçus pour convertir une forme d'énergie en une autre, permettant ainsi de répondre aux besoins énergétiques variés. Ces systèmes sont essentiels pour la production d'électricité, la fourniture de force motrice, le chauffage ou la climatisation des locaux, et bien d'autres applications industrielles. En assurant une conversion efficace de l'énergie, ils permettent d'optimiser les processus de production, d'améliorer les performances des équipements et de réduire les coûts énergétiques, contribuant ainsi à la productivité et à la rentabilité des entreprises.

Le système de conversion d'énergie présente plusieurs défauts potentiels, notamment en ce qui concerne les courts-circuits. Les courts-circuits peuvent endommager les dispositifs de protection du système, tels que les fusibles et les disjoncteurs, les rendant inefficaces et augmentant les risques d'accidents. De plus, les courts-circuits peuvent provoquer des interruptions de courant, perturbant ainsi le fonctionnement normal des équipements et entraînant des pertes économiques.

Notre étude vise à détecter et classifier les défauts de court-circuit dans les systèmes de conversion d'énergie en utilisant des techniques d'apprentissage automatique supervisé.

- **Le premier chapitre** traite des systèmes de conversion d'énergie, en mettant l'accent sur les transformateurs de puissance. Les transformateurs de puissance sont des dispositifs essentiels dans la conversion d'énergie électrique, permettant de transférer l'énergie entre les circuits à différentes tensions. Ce chapitre présente les généralités sur les transformateurs de puissance, incluant leur définition, leur principe de fonctionnement et leurs principales caractéristiques.

- **Le deuxième chapitre** porte sur la modélisation d'un transformateur de puissance en utilisant des essais à vide, en court-circuit et à sain. Il comprend également la modélisation du transformateur sur MATLAB Simulink.

- **Le troisième chapitre** introduit les réseaux de neurones artificiels (RNA) et leur utilisation dans un système de conversion d'énergie pour détecter et classifier les défauts de

court-circuit. Il présente les composants des RNA et leurs architectures, ainsi que l'application spécifique dans la détection des court-circuits. Le système utilise des capteurs pour mesurer les paramètres électriques, puis les données sont utilisées pour entraîner le RNA à reconnaître les schémas de défauts. MATLAB est utilisé pour implémenter ce système grâce à ses fonctionnalités avancées.

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1 Introduction

Le système de conversion d'énergie joue un rôle crucial dans notre société moderne, en permettant le transfert et la transformation de l'énergie d'une forme à une autre. Que ce soit dans le domaine de l'électrotechnique, de l'électronique de puissance ou de l'énergie renouvelable, les systèmes de conversion d'énergie sont essentiels pour répondre à nos besoins énergétiques croissants tout en minimisant les pertes et en optimisant l'efficacité. Dans ce premier chapitre, nous nous concentrerons particulièrement sur l'un des éléments fondamentaux des systèmes de conversion d'énergie : le transformateur de puissance. Le transformateur de puissance est un dispositif électromagnétique qui permet de modifier les caractéristiques d'une tension alternative, que ce soit en l'élevant ou en la réduisant, tout en maintenant la fréquence constante. Il joue un rôle essentiel dans le transport et la distribution de l'électricité à grande échelle, en assurant une transmission efficace et sûre de l'énergie électrique.

1.2 Sources d'énergie

Les sources d'énergie sont les différentes formes de matières ou de phénomènes naturels à partir desquels on peut extraire de l'énergie pour la convertir en une forme utilisable par les êtres humains. Ces sources peuvent être renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique ou encore la biomasse, ou non renouvelables, telles que les combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Les sources d'énergie sont à la base de tous les systèmes de conversion d'énergie, car c'est à partir d'elles que l'énergie est extraite et transformée en électricité, chaleur, ou force motrice.

1.2.1 Les sources d'énergie renouvelables

Sont des sources d'énergie qui peuvent être régénérées naturellement et en quantité suffisante pour répondre aux besoins énergétiques de la société sans s'épuiser. Par Exemple L'énergie solaire, L'énergie éolienne, L'énergie hydraulique... ect [1]



FIGURE 1.1 – : Source d'énergie renouvelable [23]

1.2.2 Les sources d'énergie non-renouvelables

Sont des sources d'énergie qui sont épuisables à l'échelle humaine et qui ne peuvent pas être régénérées à court terme. Par Exemple Les combustibles fossiles, L'énergie nucléaire... ect [2].

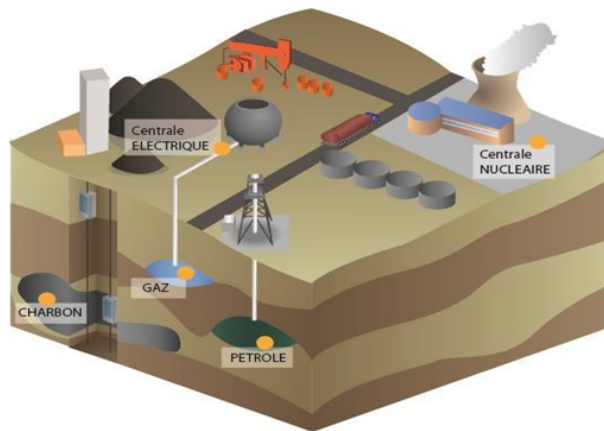


FIGURE 1.2 – : Source d'énergie non renouvelable [24]

1.3 Les différents types de systèmes de conversion d'énergie

Il existe plusieurs types de systèmes de conversion d'énergie, chacun ayant une fonction et une application spécifiques.

Voici une liste des différents types de systèmes de conversion d'énergie :[3]

- **Systèmes de conversion d'énergie électrique-mécanique** : ce sont des systèmes qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique ou vice versa. Les exemples incluent les moteurs électriques, les générateurs électriques, les servomoteurs, les actionneurs électriques, etc.
- **Systèmes de conversion d'énergie thermique-mécanique** : ces systèmes convertissent l'énergie thermique en énergie mécanique ou vice versa. Les exemples incluent les moteurs à combustion interne, les turbines à vapeur, les moteurs à piston à vapeur, les éoliennes, etc.
- **Systèmes de conversion d'énergie électrochimique** : ces systèmes convertissent l'énergie chimique en énergie électrique ou vice versa. Les exemples incluent les piles à combustible, les batteries, les supercondensateurs, etc.
- **Systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque** : ces systèmes convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Les exemples incluent les panneaux solaires photovoltaïques, les systèmes d'énergie solaire thermique, etc.
- **Systèmes de conversion d'énergie éolienne** : ces systèmes convertissent l'énergie éolienne en énergie électrique ou mécanique. Les exemples incluent les éoliennes, les éoliennes offshore, etc.
- **Systèmes de conversion d'énergie électrique** : le transformateur de puissance est un dispositif électrique qui permet de transférer l'énergie électrique d'un système à un autre en modifiant les niveaux de tension et de courant. Il est utilisé pour le transport efficace de l'électricité à travers les réseaux de distribution et de transmission.

Ces différents types de systèmes de conversion d'énergie sont utilisés dans des applications variées, allant des appareils électroniques portables aux centrales électriques à grande échelle.

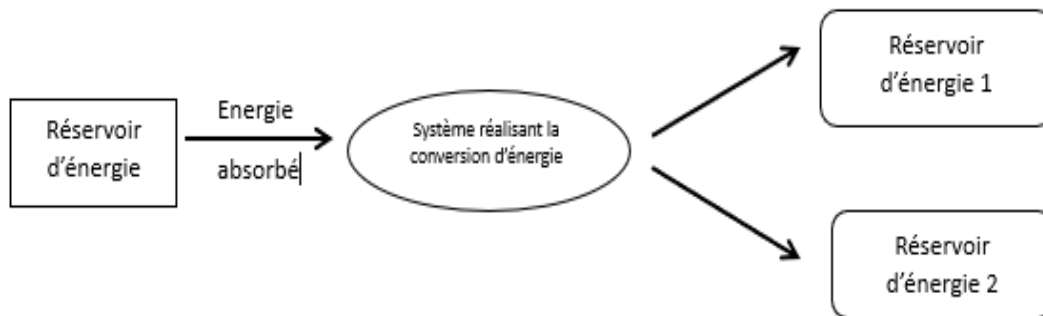


FIGURE 1.3 – : Diagramme énergétique

1.4 Principe de fonctionnement des systèmes de conversion d'énergie

1. **Des moteurs thermiques** : les moteurs thermiques sont des dispositifs qui transforment l'énergie thermique en énergie mécanique. Ils fonctionnent grâce à la combustion d'un combustible (par exemple l'essence ou le diesel) dans une chambre de combustion, qui génère de la chaleur et une pression qui pousse un piston ou une turbine à se déplacer. Cette action mécanique est ensuite convertie en travail pour produire de l'énergie électrique ou du mouvement mécanique.[3]

2. **Des turbines** : les turbines sont des dispositifs qui transforment l'énergie cinétique en énergie mécanique. Elles fonctionnent en utilisant un fluide (par exemple l'eau, la vapeur ou l'air) pour faire tourner des pales de turbine qui sont fixées à un arbre rotatif. Ce mouvement de rotation est ensuite utilisé pour produire de l'énergie électrique ou du mouvement mécanique.

3. **Des panneaux solaires** : les panneaux solaires sont des dispositifs qui convertissent l'énergie solaire en électricité. Ils sont composés de cellules solaires qui contiennent des semiconducteurs, tels que le silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe ces cellules, elle libère des électrons qui créent un courant électrique qui peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou stocké dans des batteries.[3]

4. **Des éoliennes** : les éoliennes sont des dispositifs qui convertissent l'énergie du vent en énergie électrique. Elles sont composées de pales fixées à un arbre rotatif qui est connecté à un générateur électrique. Lorsque le vent souffle sur les pales, elles tournent et font tourner l'arbre, ce qui produit de l'électricité.

5. **Des batteries** : les batteries sont des dispositifs qui stockent l'énergie électrique sous forme chimique et la libèrent lorsque cela est nécessaire. Elles sont composées

de deux électrodes (une anode et une cathode) séparées par un électrolyte. Lorsque la batterie est chargée, des ions se déplacent de l'anode vers la cathode, créant une différence de potentiel électrique. Lorsque la batterie est déchargée, les ions se déplacent dans la direction opposée, produisant de l'énergie électrique.

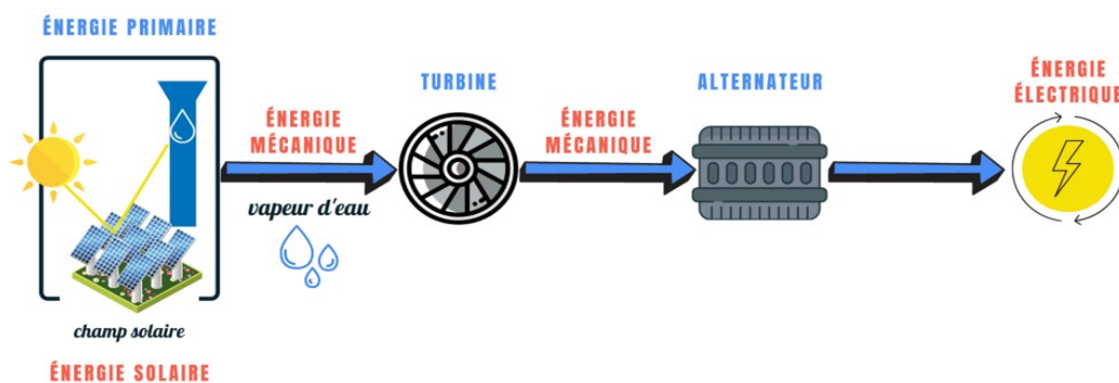


FIGURE 1.4 – : principe de fonctionnement d'une centrale électrique [25]

1.5 Caractéristiques des systèmes de conversion d'énergie

Les caractéristiques des systèmes de conversion d'énergie font référence aux différentes propriétés et paramètres qui déterminent les performances et la fonctionnalité des systèmes de conversion d'énergie. Ces caractéristiques peuvent inclure des paramètres tels que la puissance de sortie, le rendement énergétique, la fiabilité, la durabilité, la facilité d'entretien, la taille, le coût, l'impact environnemental, etc. Chaque système de conversion d'énergie a ses propres caractéristiques qui peuvent varier en fonction de la source d'énergie utilisée, de la technologie de conversion, de la taille de l'installation et de nombreux autres facteurs. Par exemple, les turbines peuvent avoir une grande puissance de sortie, mais nécessitent un grand espace pour leur installation[3]. Les panneaux solaires ont des coûts d'installation initiaux élevés, mais ne produisent aucune émission polluante. Les caractéristiques des systèmes de conversion d'énergie peuvent inclure :

- **Efficacité énergétique** : la quantité d'énergie produite par rapport à la quantité d'énergie consommée ou utilisée.
- **Capacité de production** : la quantité d'énergie que le système est capable de produire.
- **Fiabilité** : la capacité du système à fonctionner sans interruption ou défaillance.

- **Durabilité** : la durée de vie du système et sa capacité à résister à l'usure et à la dégradation au fil du temps.
- **Coût** : le coût d'installation, de maintenance et d'exploitation du système.
- **Impact environnemental** : l'impact du système sur l'environnement, y compris les émissions de gaz à effet de serre, la pollution de l'air et de l'eau, la destruction de la biodiversité, etc.
- **Disponibilité des ressources** : la disponibilité des matières premières nécessaires à la production d'énergie, telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon, le vent, le soleil, l'eau, etc.

1.6 Généralité sur transformateur de puissance

1.6.1 Définition

Un transformateur est un dispositif électrique statique conçu pour convertir efficacement un courant alternatif d'un système à un autre, en modifiant généralement à la fois l'intensité et la tension, tout en conservant la même fréquence. Il s'agit d'un appareil fondamental dans la distribution d'électricité, utilisé pour transférer de l'énergie électrique de manière sûre et efficace.[22]

1.6.2 Constitution

Il est possible de considérer qu'un transformateur est principalement composé de :

1.6.2.1 Partie active

Les éléments principaux qui la constituent sont le circuit magnétique, les enroulements et les isolants.

- **Circuit magnétique** : le circuit magnétique (figure 1.5) est un composant essentiel du transformateur de puissance qui assure la transmission efficace du flux magnétique entre les enroulements. Son choix et sa forme dépendent des spécifications et des exigences de l'application du transformateur.[11]



FIGURE 1.5 – : Circuit magnétique

- **Enroulement** : les enroulements du transformateur de puissance (figure 1.6) sont des composants essentiels qui permettent la conversion de l'énergie électrique à haute tension en énergie électrique à basse tension. Ils sont constitués de fils de cuivre ou d'aluminium isolés et enroulés autour du circuit magnétique. Leur forme et leur nombre de tours déterminent le rapport de transformation du transformateur.

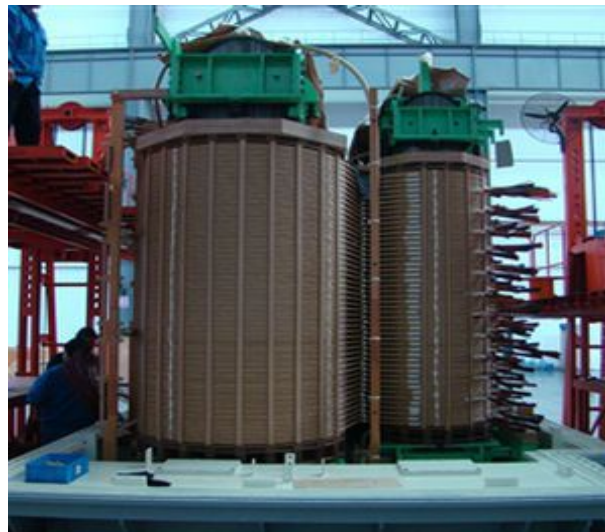


FIGURE 1.6 – : Enroulement d'un transformateur [26]

- **Isolant** : Dans un transformateur de puissance, on peut identifier deux types d'isolants distincts. Le premier est un isolant solide à base de cellulose, qui est utilisé pour isoler les spires, les enroulements, ainsi que les enroulements et la masse. Le second type d'isolant est liquide, sous forme d'huile, qui remplace les espaces d'air à l'intérieur du transformateur.[11]

1.6.2.2 Partie constructive

a. Cuve et couvercle : Des tôles en acier sont soudées pour créer une structure rigide, résistante et étanche (voir figure1.7) qui constitue le boîtier du transformateur. Les avantages de cette structure sont multiples : [12]

- Elle protège mécaniquement les parties actives (haute tension, basse tension et masse).
- Elle sert de conteneur pour le diélectrique et son système de refroidissement.
- Elle sert de support pour le circuit magnétique.
- Elle permet de contenir la majeure partie du flux de fuite généré par le courant circulant dans les enroulements à l'intérieur de la cuve.



FIGURE 1.7 – : transformateur vue extérieure

b. Traversées : Les traversées (figure1.8) sont des éléments qui permettent le passage des conducteurs entre l'intérieur et l'extérieur du boîtier du transformateur tout en assurant l'isolation électrique. Ces traversées sont généralement constituées de plusieurs parties, notamment le corps principal qui est installé à travers le boîtier, les isolateurs qui assurent l'isolation électrique et les bornes qui permettent de connecter les conducteurs à l'intérieur du transformateur. Les traversées sont conçues pour supporter les contraintes mécaniques et thermiques auxquelles elles sont soumises, ainsi que pour garantir l'étanchéité du boîtier.[10]

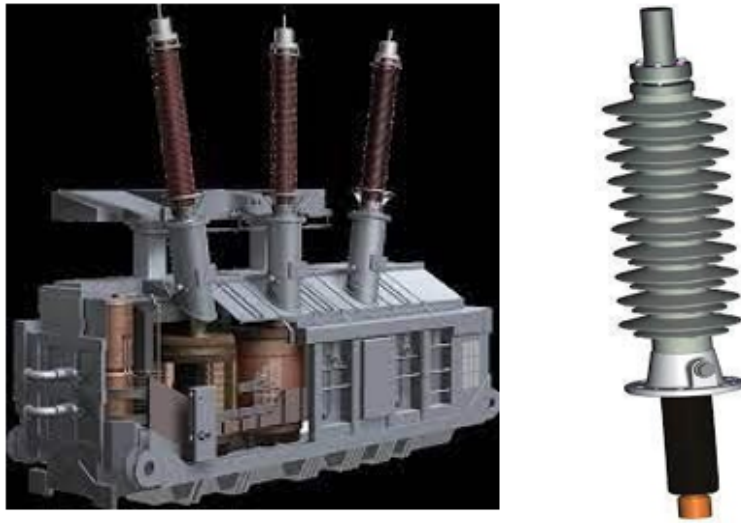


FIGURE 1.8 – : Traversées d'un transformateur de puissance [27]

c. **Equipements** : Les transformateurs de puissance sont pourvus de :

- **Changeur de prise en charge** : Le commutateur de prise de transformation est un dispositif électromécanique présent dans les transformateurs de puissance, qui permet de modifier le rapport de transformation en cours de fonctionnement. Il est composé d'un ensemble de contacts mobiles qui permettent de connecter les différentes prises du transformateur à la ligne électrique, et permet ainsi de réguler la tension de sortie du transformateur pour s'adapter à des variations de charge ou de tension sur le réseau électrique.



FIGURE 1.9 – : changeur de prise en charge [28]

- **Refroidissements** : Le refroidissement du transformateur fait référence aux méthodes utilisées pour dissiper la chaleur générée par le fonctionnement du transformateur de puissance, qui peut entraîner une élévation de la température et causer des dommages au transformateur s'il n'est pas correctement géré. Les méthodes de refroidissement courantes pour les transformateurs de puissance incluent l'utilisation d'huile isolante pour transférer la chaleur du cœur du transformateur vers le radiateur externe par convection naturelle ou forcée, ainsi que l'utilisation d'autres liquides de refroidissement tels que l'eau ou l'air. Les transformateurs peuvent également être refroidis par immersion dans un liquide, tel que l'huile, ou par un système de circulation d'eau à travers les canaux de refroidissement intégrés au transformateur. Le choix de la méthode de refroidissement dépendra des exigences de puissance, de la conception du transformateur et de l'environnement d'exploitation.



FIGURE 1.10 – : radiateur et ventilateur

- **Conservateur** :Le conservateur du transformateur est un réservoir d'huile situé au-dessus du transformateur qui remplit plusieurs fonctions, notamment :
 - Absorber les changements de volume d'huile résultant des variations de température.
 - Éliminer l'humidité de l'air pour empêcher toute pénétration d'humidité dans l'huile.
 - Inclure un ballon en nitrile pour empêcher le contact de l'air avec l'huile.
 - Afficher le niveau d'huile en fonction de la température et émettre une alarme en cas de niveau trop bas.

1.6.3 Principe de fonctionnement

1.6.3.1 Principe général

Afin d'assurer son bon fonctionnement, un transformateur est composé d'enroulements primaire et secondaire interconnectés par un circuit magnétique qui dirige le flux généré par les enroulements (Figure1.11). Ces éléments actifs sont logés dans une cuve qui leur offre un soutien mécanique et une protection. Il est crucial d'assurer une résistance aux contraintes diélectriques à basses et hautes fréquences, ainsi que d'assurer l'élimination des pertes.[12]

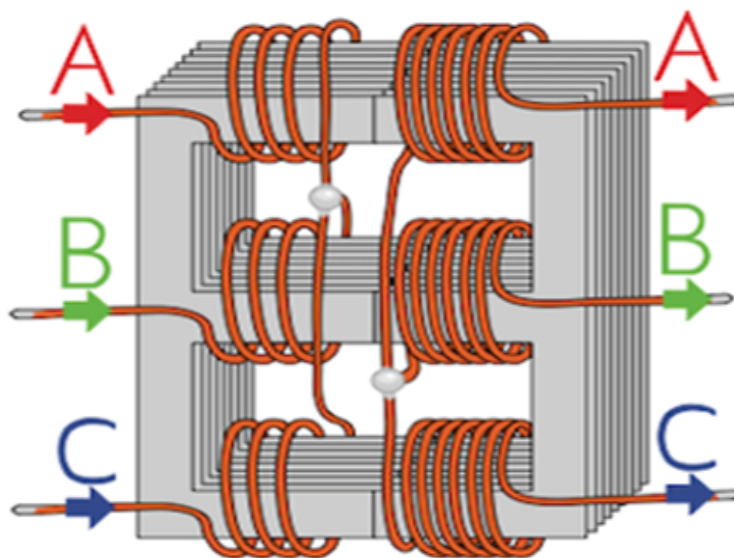


FIGURE 1.11 – : Schéma de principe d'un transformateur Triphasé [29]

1.6.3.2 Réglage

Les gestionnaires de réseau électrique s'assurent que les clients reçoivent une tension stable. Pour y parvenir, ils doivent réguler la tension, et le régulateur ou changeur de prises est l'organe principal qui leur permet de réaliser cette régulation, situé à l'intérieur du transformateur. Les applications industrielles électro-intensives utilisent également le réglage de tension pour réguler la charge du processus. Les régulateurs peuvent être très complexes et sont divisés en deux catégories : ceux qui fonctionnent hors tension et ceux qui fonctionnent sous charge. Le régulateur est connecté à l'un des enroulements du transformateur, généralement l'enroulement haute tension, qui est équipé de prises supplémentaires et intermédiaires. Le placement sur différentes prises fait varier le rapport de transformation du transformateur. Si un grand nombre de prises est nécessaire, un enroulement de

réglage dédié est alors fabriqué, doté de prises sur ses spires. Ce dernier est souvent positionné à l'extérieur d'une phase, pour des raisons pratiques, et est connecté en série avec l'enroulement haute tension.

1.6.3.3 Couplage des enroulements

D'après ce qui est présenté dans la figure 1.12, il existe trois schémas fondamentaux de couplage entre les enroulements du primaire et du secondaire, à la fois du côté Haute Tension (HT) et du côté Basse Tension (BT).[11]

- **Le couplage en étoile** est largement utilisé dans les applications de basse tension, car il permet la séparation du point neutre, ce qui facilite l'obtention de tensions simples et composées.
- **Le couplage triangle** ne permet pas la sortie du neutre; de plus, comme les enroulements sont alimentés par la tension composée, ils nécessitent un plus grand nombre de spires qu'en étoile.
- **Les enroulements de couplage en zigzag** sont séparées en deux demi-bobines positionnées sur des colonnes distinctes. De plus, la deuxième demi-bobine est disposée en inversant sa polarité par rapport à la première. Cette configuration permet d'obtenir une répartition plus équilibrée des tensions sur un réseau basse tension déséquilibré.

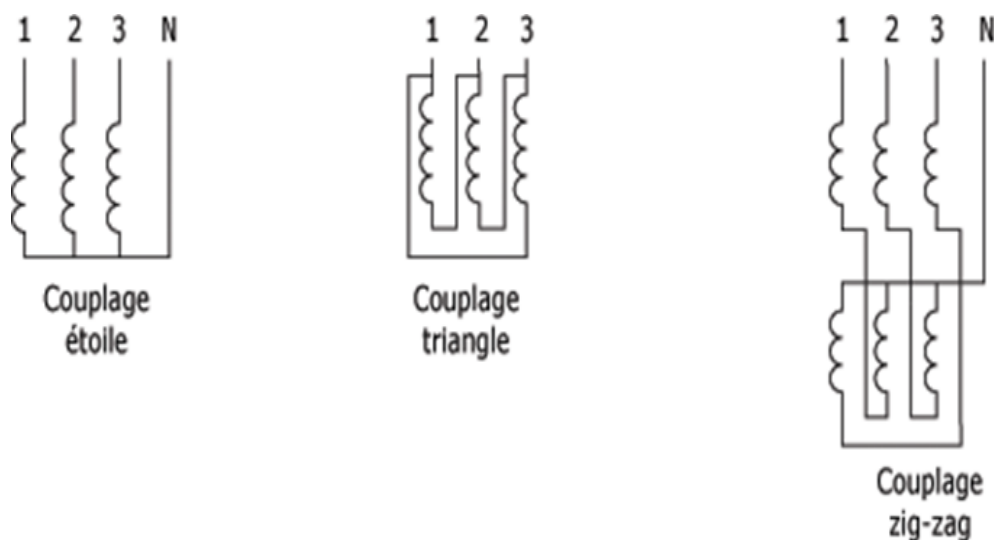


FIGURE 1.12 — : couplage du transformateur triphasé [11].

1.6.4 Caractéristique d'un transformateur de puissance

- **Tension** : Le transformateur est conçu pour fonctionner avec une certaine plage de tensions d'entrée et de sortie. La tension nominale est la tension pour laquelle le transformateur est conçu.
- **Puissance** : La puissance nominale du transformateur est la quantité d'énergie qu'il peut transférer en continu. Cette valeur est généralement exprimée en VA ou en kVA.[8]
- **Fréquence** : Le transformateur est conçu pour fonctionner avec une certaine fréquence. La fréquence nominale est la fréquence pour laquelle le transformateur est conçu.
- **Impédance** : L'impédance du transformateur est la résistance à l'écoulement du courant dans le circuit magnétique du transformateur. L'impédance est généralement exprimée en pourcentage de la puissance nominale.
- **Efficacité** : L'efficacité du transformateur est la quantité d'énergie électrique qui est transférée du circuit d'entrée au circuit de sortie. Elle est généralement exprimée en pourcentage.[8]
- **Isolation** : Le transformateur est conçu pour fournir une isolation électrique entre le circuit d'entrée et le circuit de sortie. L'isolation est nécessaire pour des raisons de sécurité et pour éviter les interférences électromagnétiques.
- **Refroidissement** : Le transformateur produit de la chaleur lorsqu'il fonctionne. Il est donc important de le refroidir pour éviter une surchauffe. Le refroidissement peut être réalisé à l'aide d'un ventilateur, d'un radiateur ou d'un échangeur de chaleur.[8]
- **Type de noyau** : Le noyau du transformateur peut être fabriqué en acier au silicium ou en ferrite. Les noyaux en acier au silicium sont utilisés pour les applications de puissance élevée, tandis que les noyaux en ferrite sont utilisés pour les applications de faible puissance.
- **Type de bobine** : Les bobines du transformateur peuvent être en cuivre ou en aluminium. Les bobines en cuivre sont plus coûteuses, mais offrent une meilleure conductivité électrique et une meilleure résistance à la corrosion.
- **Type de montage** : Le transformateur peut être monté sur une structure ou sur une base. Le type de montage dépend de l'application et de l'environnement dans lequel le transformateur sera utilisé.

1.6.5 Défauts affectant les transformateurs

Ci-dessous est énumérée une liste des différentes anomalies qui peuvent affecter le fonctionnement d'un transformateur de puissance :

TABLEAU 1.1 – Défauts liée au transformateur

Contraintes	Cause possible	Défaillances pouvant être occasionnés
Surtension	Externe :Décharges atmosphériques (foudre) Interne : Manœuvre	*Des défauts d'isolement entre les spires d'un même enroulement. * Des défauts à la masse. * Des défauts entre les enroulements. * Des claquages entre les spires. * Des claquages diélectriques.
Surcharge	Surcharge normale et Surcharge anormale	* Une destruction des enroulements aux points les plus chauds, pouvant entraîner un court-circuitage des spires. * Une dégradation des systèmes d'isolation huile/cellulose.
Courts-circuits	Externe et Interne	*Destruction des enroulements aux points les plus chauds avec court-circuitage de spires. * Dégradation des systèmes d'isolement huile/cellulose. * Incendie au niveau de l'arc du court-circuit. * Échauffement des circuits magnétiques.
Vieillessement	Cumul de contraintes antérieur	* Claquage entre spires. * Evolution possible à la terre.
Défaut de montage		*Fusion des tôles du circuit magnétique.
Le défaut à la terre		* Destruction du transformateur et du circuit magnétique.
Déséquilibre de la charge		* L'apparition d'un flux magnétique induit une élévation de la température du circuit magnétique et des éléments environnants.

1.6.6 Protection des transformateurs

Les dispositifs de protection d'un transformateur sont conçus pour remplir deux objectifs distincts :

préserver le transformateur contre des contraintes excessives ou réduire les conséquences d'un défaut interne[9]. Afin de détecter ces défauts, des systèmes de protection interne et externe sont installés sur le transformateur.[13]

1.6.6.1 Protections interne

a. Relais Buchholz : Le relais Buchholz(figure 1.13) est un dispositif de protection utilisé pour les transformateurs électriques. Il est installé entre le réservoir d'huile et le transformateur. Le relais Buchholz surveille le dégagement de gaz et le niveau d'huile dans le transformateur[13]. Il est conçu pour détecter les anomalies telles que les courts-circuits, les défauts d'isolement, les fuites d'huile et les surchauffes. Lorsqu'une anomalie est détectée, le relais Buchholz envoie un signal pour déclencher une alarme ou pour couper l'alimentation électrique du transformateur, afin d'éviter des dommages plus importants ou des accidents.

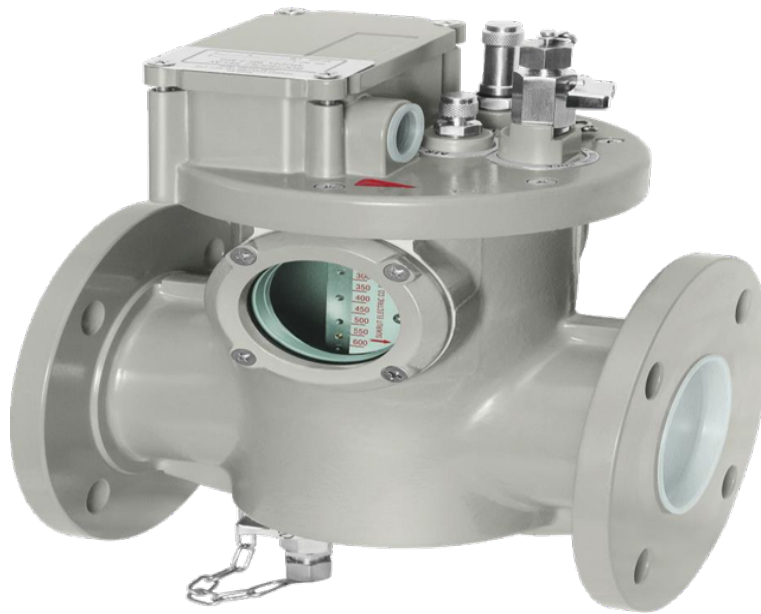


FIGURE 1.13 – : Relais Buchholz [13].

b. Soupape de surpression : La soupape de surpression d'un transformateur (figure 1.14) est un dispositif de sécurité qui est installé pour protéger le transformateur contre les surpressions. Elle est conçue pour relâcher la pression excessive de l'intérieur du transformateur, provoquée par une élévation de température ou une surcharge électrique. Lorsque la pression à l'intérieur du transformateur dépasse la limite de sécurité, la soupape de surpression s'ouvre automatiquement pour permettre la libération de l'excès de pression et ainsi éviter des dommages ou des explosions.[13]



FIGURE 1.14 – : Soupape de surpression [13]

1.6.6.2 Protections externes

a. Les relais : Les relais sont des dispositifs de protection électrique qui sont utilisés pour surveiller et contrôler le fonctionnement des transformateurs. Ces relais sont conçus pour détecter les conditions anormales, telles que les surcharges, les surtensions, les sous-tensions, les courts-circuits, les déséquilibres de phase, les défauts d'isolement et les pertes de phase, qui peuvent endommager le transformateur ou causer des pannes[9]. Lorsqu'une condition anormale est détectée, les relais d'un transformateur envoient un signal pour déclencher une alarme ou pour couper l'alimentation électrique du transformateur afin d'éviter des dommages plus importants ou des accidents. Les relais d'un transformateur sont un élément important du système de protection des équipements électriques et sont essentiels pour assurer la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques.

b. Fusible à haut pouvoir de coupure : Le fusible à haut pouvoir de coupure est conçu pour préserver le transformateur lorsque des surintensités de courant de grande intensité surviennent, ou pour atténuer les conséquences d'un défaut interne. En revanche, le fusible ou le disjoncteur installé en amont de l'enroulement à haute tension sont destinés à assurer la protection du réseau électrique.[9]

c. Parafoudre et éclateur de protection : Les parafoudres et éclateurs de protection sont des dispositifs pour protéger les transformateurs contre les surtensions. Les parafoudres dévient les surtensions vers la terre, tandis que les éclateurs de protection

s'ionisent pour créer un chemin de décharge vers la terre. Ils sont essentiels pour prolonger la durée de vie des équipements électriques et éviter les dommages causés par les surtensions. Les parafoudres sont constitués de matériaux diélectriques et de composants électriques. Les éclateurs de protection sont des dispositifs mécaniques qui fonctionnent en ouvrant un chemin pour la surtension. Les deux dispositifs sont généralement utilisés ensemble pour fournir une protection optimale. Les parafoudres et éclateurs de protection sont essentiels pour les transformateurs utilisés dans les réseaux électriques. Les surtensions peuvent endommager les équipements électriques, causer des pannes de courant et mettre en danger la sécurité du public.

1.6.7 Maintenance des transformateurs

L'objectif de la maintenance est d'assurer la fiabilité, la disponibilité et la durée de vie des installations . [9]

Elle est basée essentiellement sur le contrôle de :

1.6.7.1 Aspect générale (périodicité chaque mois)

- Contrôle général.
- Propreté.
- Etat extérieur des bornes.
- Etat de la peinture.
- Bruit.

1.6.7.2 Humidité

- Périodicité chaque mois.
- Contrôle de l'état de dessiccateur « silicagel ».
- Mesure de l'humidité dans le papier .

1.6.7.3 Groupes de réfrigération

- Permutation des groupes de réfrigération (périodicité 3 mois).
- Nettoyage des radiateurs (périodicité 1 ans).
- Remplacement des enroulements des ventilateurs (périodicité 8 ans).

1.6.7.4 Huile

- Analyse physico-chimique (périodicité 2 ans).
- Analyse de gaz dissous.

- Analyse des composés furaniques.

1.6.7.5 Bornes de traverses

- Contrôle des niveaux d'huile ou des pressions (périodicité 6 mois).
- Nettoyage des porcelaines (périodicité de 6 à 12 mois).

1.6.7.6 Contrôle de l'étanchéité (périodicité chaque ans)

- Les vannes.
- Couvercle .
- La soupape de surpression .

1.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré l'importance des systèmes de conversion d'énergie dans la production, la distribution et l'utilisation de l'énergie qui alimente nos sociétés modernes. Nous avons examiné les divers types de systèmes de conversion d'énergie, allant des sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles aux sources d'énergie renouvelable telles que le solaire et l'éolien.

Nous nous sommes également concentrés sur les transformateurs de puissance, en détaillant leur structure, leur principe de fonctionnement, leurs applications ainsi que leurs caractéristiques et avantages. Ces dispositifs jouent un rôle crucial dans le transport efficace de l'électricité en modifiant les niveaux de tension et de courant.

Ce chapitre fournit une base solide pour la compréhension des concepts fondamentaux liés aux systèmes de conversion d'énergie et aux transformateurs de puissance.

Chapitre 2

Modélisation d'un transformateur de puissance

2.1 Introduction

Dans notre deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur la modélisation d'un transformateur de puissance, en mettant l'accent sur les applications numériques des lois à vide et en court-circuit. Nous avons également exploré la modélisation du transformateur en utilisant MATLAB.

Dans ce chapitre, nous avons plongé dans l'étude des lois à vide et en court-circuit d'un transformateur de puissance. Nous avons analysé les caractéristiques et les comportements du transformateur lorsqu'il fonctionne sans charge (à vide) et lorsqu'il est court-circuité. Notre objectif principal était de comprendre comment le transformateur réagit dans ces deux conditions extrêmes et d'extrapoler ces résultats pour des scénarios réels.

Ce chapitre revêt une importance cruciale pour acquérir une compréhension approfondie de la modélisation d'un transformateur de puissance.

2.2 Représentation schématique du transformateur de puissance

Pour représenter un transformateur en charge par son schéma équivalent, celui-ci doit consommer du courant du réseau électrique avec une tension primaire déterminée U_1 , équivalente à celle du transformateur réel. Afin de concevoir cette représentation schématique, il est nécessaire d'exprimer la tension primaire U_1 du transformateur en fonction du courant primaire I_1 qui le traverse.[16]

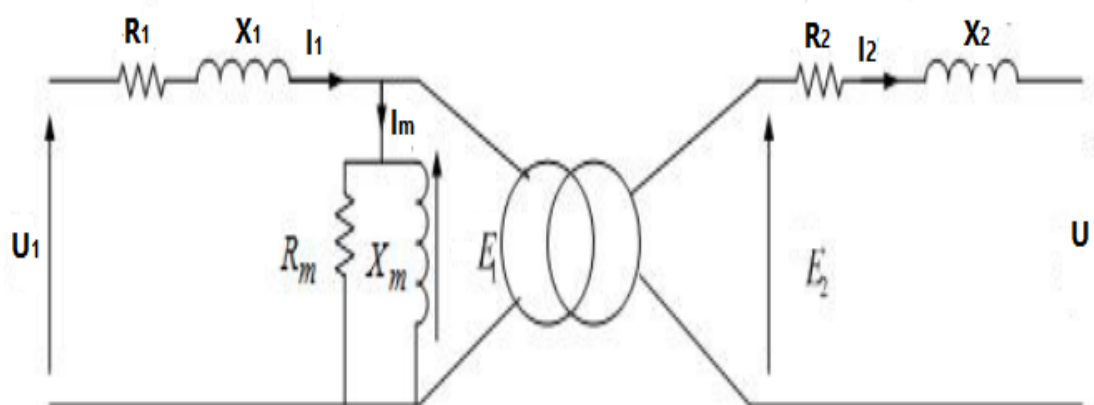


FIGURE 2.1 – : Le schéma électrique équivalent du transformateur de puissance .

2.2.1 Essai à vide

L'essai à vide permet de mesurer les grandeurs électriques absorbées par un transformateur qui fonctionne sans charge. Pendant cet essai, l'enroulement primaire est connecté à une source d'alimentation électrique, tandis que l'enroulement secondaire est laissé ouvert et non connecté à un circuit d'utilisation, ce qui fait que le courant secondaire devient nul ($I_2 = 0$). Le courant circulant dans le primaire, appelé courant à vide I_0 , est déterminé par l'impédance à vide Z_m fournie par le schéma équivalent (Figure 2.2).

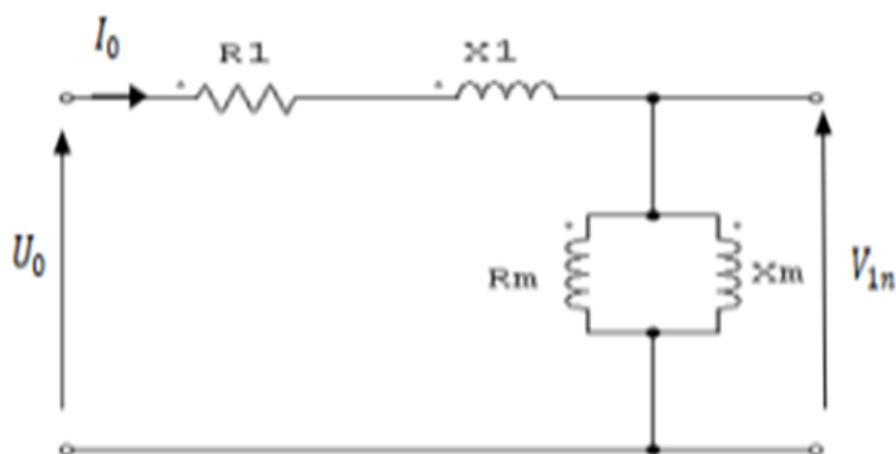


FIGURE 2.2 – : schéma équivalent du transformateur à vide [30]

L'essai à vide vise à obtenir les informations suivantes :

- La valeur de la puissance dissipée dans le fer du transformateur due à l'effet de l'hystérésis magnétique. Les pertes de fer du transformateur sont pratiquement égales à la puissance totale absorbée pendant l'essai à vide.
- Le courant à vide I_0 est en effet très faible en pourcentage de la valeur nominale et ne circule que dans l'enroulement primaire, ce qui rend les pertes dans le cuivre négligeables par rapport aux pertes de fer.[17]

2.2.1.1 Détermination des paramètres par l'essai à vide

L'essai à vide est réalisé en ouvrant l'enroulement secondaire du transformateur, comme indiqué sur (la figure 2.2).

une source de tension réglable est utilisée pour alimenter le transformateur avec une faible puissance qui représente quelques pourcents de la puissance nominale du transformateur.[14] La tension U_1 est progressivement augmentée depuis zéro jusqu'à $1.1 \times U_{1n}$, tandis que l'intensité du courant $I_1 = I_0$ et la puissance P_0 absorbée par le transformateur

sont mesurées à la fréquence nominale $f = f_n$. En utilisant les résultats de ces mesures, les courbes représentant la variation du courant à vide I_0 , de la puissance P_0 et du facteur de puissance en fonction de la tension simple U_1 peuvent être tracées.[14]

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{U_1 \times I_0} \quad (2.1)$$

Les courbes du transformateur triphasé sont élaborées en utilisant la valeur moyenne du courant monophasé :

$$I_0 = \frac{I_{oA} + I_{oB} + I_{oC}}{3} \quad (2.2)$$

la tension simple moyenne :

$$U = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} \quad (2.3)$$

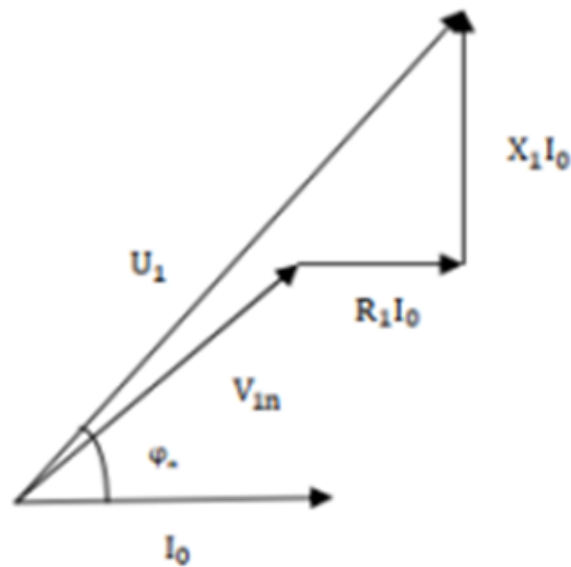


FIGURE 2.3 – : Diagramme vectoriel de transformateur à vide [30]

a. Le rapport de transformation k : Le rapport de transformation k d'un transformateur peut être défini de deux manières : soit en comparant la tension secondaire à la tension primaire, soit en prenant en compte le rapport entre le nombre de spires dans le bobinage secondaire et le bobinage primaire.

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad (2.4)$$

b. Le courant à vide I_0 :

$$I_0 = \frac{U_1}{(R_1 + R_m) + j(x_1 + X_m)} \quad (2.5)$$

$(R_1 + R_m) + j(x_1 + X_m)$: l'impédance à vide de transformateur.

Le courant en pourcent :

$$I_0(\%) = \frac{I_0}{I_{1n}} 100\% \quad (2.6)$$

tant que $R_1 \ll R_m$ et $x_1 \ll X_m$:

$$Z_m = R_m + jX_m \quad (2.7)$$

Le courant sans charge comprend une partie réactive principalement associée à l'excitation du circuit de magnétisation (le courant de magnétisation) et une partie active qui représente les pertes sans charge.

$$I_m = I_{ma} + I_{mr} \quad (2.8)$$

Le courant à vide est de l'ordre de 0.5% à 10% du courant nominale.[34]

c. Les pertes à vides : Malgré la construction du circuit magnétique du transformateur à partir d'un empilage de fines tôles d'acier spéciales, les pertes magnétiques qui se produisent à travers l'hystérésis et le courant de Foucault sont estimées à environ 0,1% à 2% de la puissance nominale du transformateur.

$$P_{10} = R_1 \times (I_0)^2 \quad (2.9)$$

Étant donné la faible valeur du courant à vide, les pertes qui en découlent peuvent être négligées par rapport aux pertes en régime nominal.

$$P_{1n} = R_1 \times (I_{1n})^2 \quad (2.10)$$

Lorsque les pertes électriques sont négligeables, on peut considérer que les pertes à vide (p_0) sont équivalentes aux pertes dans le circuit magnétique du transformateur :

$$P_0 \approx P_{\text{fer}} \quad (2.11)$$

et :

$$P_0 = U_0 \times I_0 \times \cos \varphi_0 \quad (2.12)$$

Ainsi, la puissance active consommée à vide sera convertie en pertes dans le circuit magnétique du transformateur.[33]

d.Facteur de puissance :

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_1 I_0} \quad (2.13)$$

Si l'on considère que Z_1 est approximativement égal à zéro, on peut exprimer la définition de l'impédance mutuelle par la relation suivante :

$$Z_m = \frac{U_1 n}{I_0} \quad (2.14)$$

Sa composante résistive :

$$R_m = \frac{V_0^2}{P_0} \quad (2.15)$$

Sa composante réactive :

$$X_m = \frac{V_0^2}{Q_0} \quad (2.16)$$

2.2.2 L'essai en court-circuit

Le test de court-circuit implique la mesure des grandeurs absorbées par un transformateur lorsque son enroulement secondaire est court-circuité et que le primaire est alimenté avec une tension réduite de manière appropriée pour garantir que les courants dans les deux enroulements soient égaux à leurs valeurs nominales. Pendant ce test, la puissance absorbée par le transformateur correspond aux pertes dans le cuivre du transformateur. Cependant, il est crucial de noter que le fonctionnement en court-circuit représente une condition limite pour le transformateur, car il provoque la fermeture de l'enroulement secondaire sur lui-même, entraînant une tension nulle à ce niveau. Le test de court-circuit peut être très dangereux pour le transformateur car il peut entraîner des courants de court-circuit (I_{1CC} et I_{2CC}) atteignant environ 2,5 à 7 fois les valeurs nominales, tandis que le transformateur est alimenté sous tension nominale.[35]

2.2.2.1 Détermination des paramètres par l'essai en court-circuit

En situation de court-circuit, la charge du transformateur présente une impédance nulle et la tension au niveau de l'enroulement secondaire est également nulle ($U_2 = 0$).

Dans le cas de systèmes triphasés, un court-circuit symétrique se produit lorsque toutes les bornes de l'enroulement secondaire sont connectées ensemble.

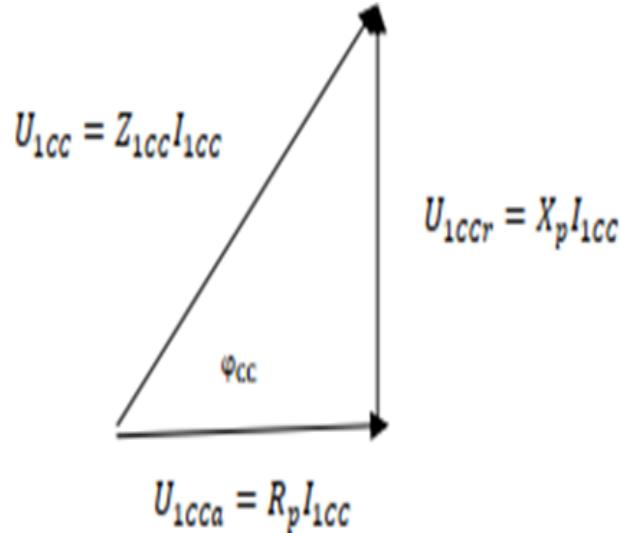


FIGURE 2.4 – : Diagramme vectoriel de transformateur en court-circuit [30]

a. Tension de court-circuit U_{1cc} : La tension appliquée au transformateur a été réduite jusqu'à ce que la valeur de U_{1cc} soit atteinte, permettant ainsi aux courants dans les enroulements du transformateur d'atteindre leurs valeurs nominales respectives. Cette valeur de U_{1cc} est couramment désignée comme la "tension nominale de court-circuit" ou simplement la "tension de court-circuit".

En pratique, la tension de court-circuit est souvent exprimée en pourcentage :

$$U_{1cc}(\%) = \frac{U_{1cc}}{U_n} \times 100 \quad (2.17)$$

La tension U_{1cc} est le résultat du produit entre le courant traversant le transformateur et l'impédance de court-circuit Z_{1cc} , telle qu'elle est perçue depuis le primaire du transformateur :

$$U_{1cc} = Z_{1cc} \cdot I_{1cc} \quad (2.18)$$

La tension de court-circuit peut être décomposée en deux composantes : U_{1cca} et U_{1ccr} , qui sont respectivement appelées la chute de tension active de la résistance du court-circuit R_{1cc} du primaire, et la chute de tension réactive de la réactance du court-circuit X_{1cc} . [34]

$$U_{1cc} = \sqrt{U_{1cca}^2 + U_{1ccr}^2} \quad (2.19)$$

$$U_{1cca} = R_p \times I_{1cc} = \frac{I_n R_p}{U_n} \times 100 \quad (2.20)$$

$$U_{1ccr} = X_p I_{1CC} = \frac{I_n x_p}{U_n} \times 100 \quad (2.21)$$

b. L'impédance de court-circuit :

$$Z_{1cc} = \frac{U_{1cc}}{I_{1n}} = \sqrt{(R_p^2) + (x_p^2)} \quad (2.22)$$

Sa composante active :

$$R_p = \frac{P_{cc}}{3I_{1n}^2} = Z_{1CC} \cos \varphi \quad (2.23)$$

Sa composante réactive :

$$x_p = \sqrt{Z_{1cc}^2 - R_{1cc}^2} = Z_{1cc} \sin \varphi \quad (2.24)$$

c. Pertes de court-circuit : Lorsqu'un transformateur fonctionne en régime de court-circuit, la puissance active absorbée P_{1cc} sera dissipée sous forme de pertes joules dans la résistance du court-circuit R_{1cc} . [35]

$$P_{1cc} = U_{1cc} \cdot I_{1cc} \cdot \cos \varphi = R_p I_{1cc}^2 \quad (2.25)$$

La puissance réactive :

$$Q_{1cc} = x_p I_{1cc}^2 \quad (2.26)$$

d. Rendement :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.27)$$

P2 :(Puissance rendue).

P1 :(Puissance absorbée).

2.3 Description du transformateur à modéliser

Le transformateur triphasé fabriqué par Vijai Electricals en 2015 est un équipement électrique fiable et robuste. Il fonctionne à une tension nominale de 60 kV côté haute tension (HT) et 30 kV côté basse tension (BT), avec une puissance assignée de 32 000 kVA. Ce transformateur est conçu pour une fréquence de 50 Hz.

Grâce à sa conception de haute qualité, ce transformateur triphasé assure une conversion efficace de l'énergie électrique entre les différentes tensions. Il est principalement utilisé dans les systèmes de transmission d'électricité à grande échelle pour réduire les pertes d'énergie sur de longues distances. Il peut également être utilisé dans les postes de distribution pour fournir de l'électricité aux consommateurs industriels ou résidentiels.

Vijai Electricals Ltd., HYDERABAD, INDIA PLAQUE SIGNALITIQUE					
TYPE	TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE	ANNEE DE FABRICATION	2015		
TYPE DE REFROIDISSEMENT	ONAN (80%) ONAF (100%)	N° DE SERIE TRANSFORMATEUR	90144A010		
PUISSANCE ASSIGNEE	kVA { HT	32000 40000	FREQUENCE	Hz 50	
	MT	32000 40000	NO. DE PHASES	3	
TENSION ASSIGNEE A VIDE	kV { HT	60	MODE DE COUPLAGE	YNyn0	
	MT	31.5	REFERENCE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE °C	50	
COURANT DE LIGNE ASSIGNE A	{ HT	307.920 384.900	ECHAUFFEMENT DE L'HUILE DE LA PARTIE SUPERIEURE °C	50	
	MT	586.515 733.143	Echauffement des enroulements °C	55	
% IMPEDANCE BASE 40 MVA	HT-MT	GARANTIE	MESUREE	ELEVATION DE LA TEMPERATURE DU POINT LE PLUS CHAUD °C	65
		12.0%	11.49	POIDS TOTAL	kg 63100
PERTE A VIDE	kW	23	21.62	POIDS DU CIRCUIT MAGNETIQUE	kg 19100
PERTE EN CHARGE	kW	150	157.330	POIDS TOTAL DU CUIVRE	kg 7300
PERTE AUX.	kW	2.5	2.31	POIDS DE DECUVAGE	kg 31100
PERTES TOTALE	kW	175	161.26	POIDS DU TRANSPORT (AVEC L'HUILE)	kg 45400
NIVEAU D'INSOLATION	{	HT	CF 325 FI 140	QUANTITE D'HUILE (CEI-60296)	kg 13300
		MT	CF 170 FI 70	MARQUE D'HUILE/TYPE D'HUILE	kg CEI 60296
		HTN	CF 325 FI 140	CONSTANTE / TEMPS TRANSFORMATEUR	Hrs 5.5
		MTN	CF 170 FI 70	REFERENCE STANDARD	CEI-60076
REFERENCE CLIENT	CAMEG Spa, Route Nationale No. 38 Gue de Constantine - ALGER, ALGERIA.				
LOI No.	Contract No. 22/13 CAMEG dated 28.11.13				

FIGURE 2.5 – : plaque signalétique du transformateur utilisé

2.3.1 Application numérique

2.3.1.1 Circuit ouvert

$$* I_0 = 0.08 \text{ A}$$

$$* V_0 = 30000 \text{ V}$$

$$* P_0 = 4608 \text{ W}$$

$$* K = \frac{U_2}{U_1} = 0.5$$

$$* P_0 = 3V_0I_0c \cos \phi$$

$$* \cos \phi = 0.64 \longrightarrow \phi = 50.2^\circ$$

$$* R_m = \frac{V_{oc}}{I_0c \cos \phi} = 1171875 \Omega$$

$$* \sin \phi = 0.768$$

$$* X_m = \frac{V_0c}{I_0c \sin \phi} = 976562.5 \Omega$$

2.3.1.2 court-circuit

$$* P_{cc} = 3594240 \text{ W}$$

$$* I_{cc} = 62.5 \text{ A}$$

$$* V_{cc} = 30000 \text{ V}$$

$$* R_{\acute{e}q} = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} = 306.7$$

$$* X_{\acute{e}q} = \sqrt{\left(\frac{|V_{cc}|}{|I_{cc}|}\right)^2 - R_{\acute{e}q}^2} = 369.23$$

2.4 Modélisation sur Matlab

2.4.1 Modèle de simulation du transformateur en état sain

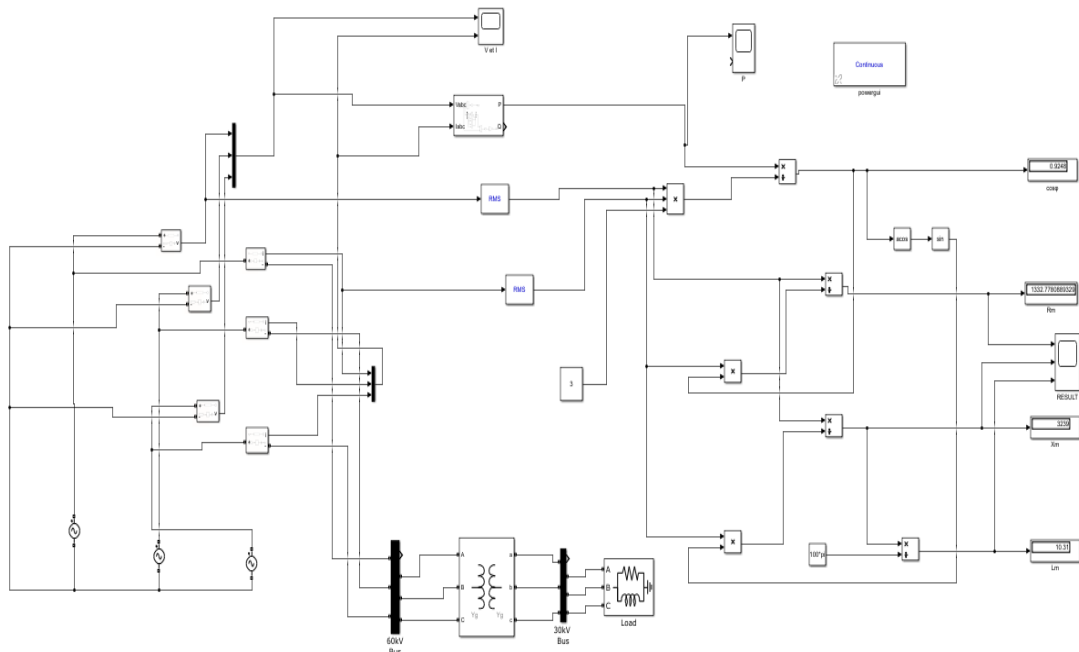


FIGURE 2.6 – : Modèle de simulation du transformateur en état sain

La figure 2.6 représente le modèle de simulation d'un transformateur triphasé sur MATLAB dans un état sain. Ce modèle de simulation est une représentation virtuelle du transformateur qui permet d'étudier son comportement et ses performances dans des conditions normales de fonctionnement.

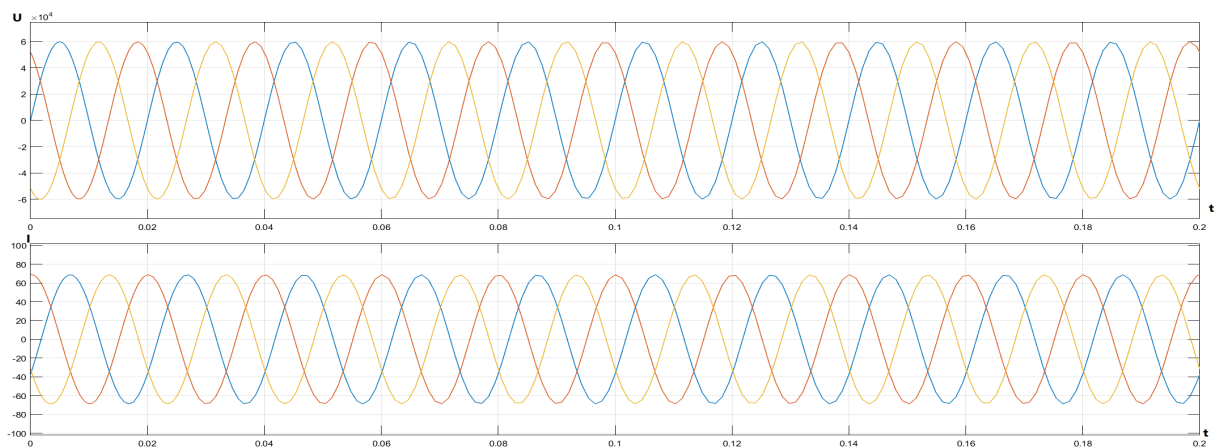


FIGURE 2.7 – : Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur

La figure 2.7 illustre les différentes tensions et courants présents à l'entrée du transformateur lorsqu'il fonctionne normalement, c'est-à-dire dans un état sain. Cette représentation visuelle fournit une vision détaillée des grandeurs électriques associées au transformateur dans des conditions de fonctionnement optimales.

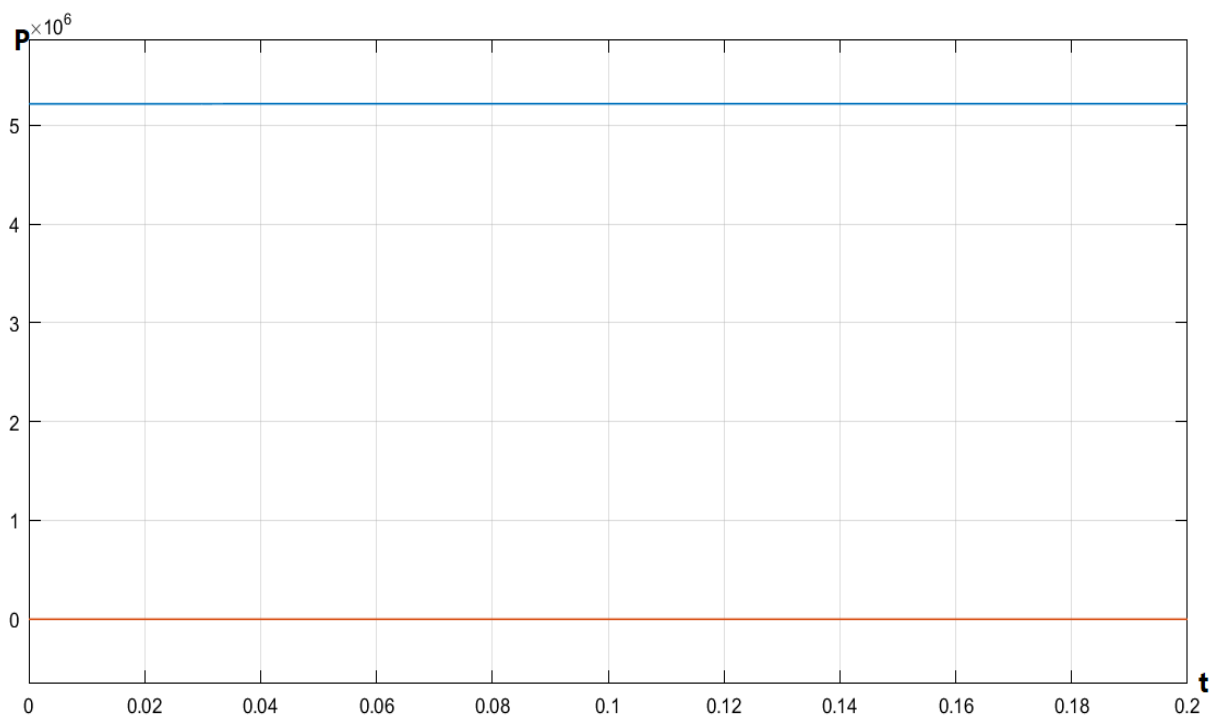


FIGURE 2.8 – : la puissance active de l'entrée du transformateur

La figure 2.8 présente la puissance active de l'entrée du transformateur lorsque celui-ci est en fonctionnement normal, c'est-à-dire en état de bon fonctionnement. Cette représentation graphique offre une vue détaillée de la quantité de puissance réellement utilisée à l'entrée du transformateur dans des conditions optimales.

2.4.2 Modèle a vide

Le modèle Simulink du transformateur triphasé fait usage de plusieurs instruments de mesure tels que des voltmètres et des ampèremètres, ainsi que des multiplexeurs pour le traitement des signaux. Pour visualiser les signaux générés, des oscilloscopes sont utilisés. De plus, la boîte à outils 'PowerGUI' est employée pour exécuter les blocs 'display', qui permettent d'afficher les signaux de sortie. Le schéma final du circuit à vide utilisé par Simulink est représenté dans (la figure 2.9).

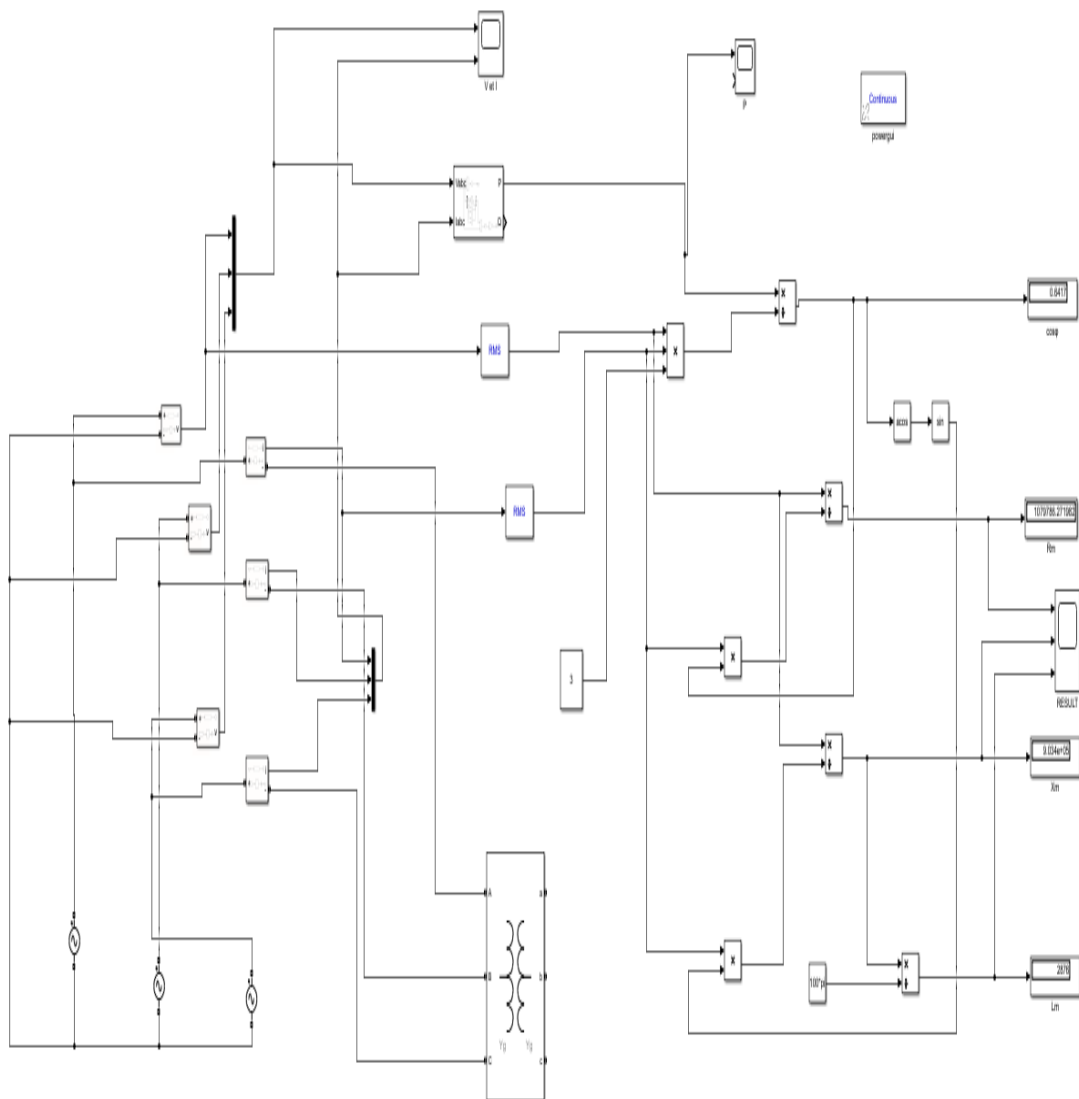


FIGURE 2.9 – : Modèle du transformateur à vide

2.4.2.1 Résultat de simulation en circuit-ouvert

Selon l'illustration présentée sur la Figure 2.10, il est observé que le courant absorbé à vide est extrêmement faible, mais rarement nul en raison de la présence continue d'un courant de magnétisation. L'intensité maximale de ce signal est de $I_0=0,08A$.

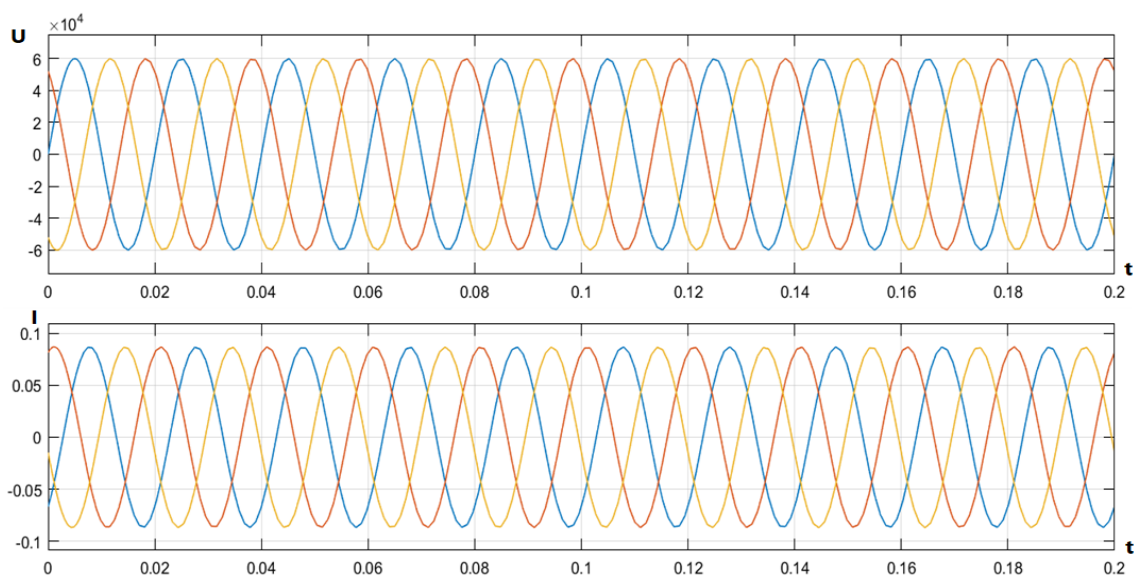


FIGURE 2.10 – : Les tensions et les courants à l'entrée du transformateur à vide

La courbe représentée sur la (Figure 2.11) illustre la puissance active de l'entrée du transformateur en circuit ouvert. Cette puissance active est mesurée sur une période de temps allant de 0 à 0,2 seconde. Durant cette période, la puissance active reste constante à une valeur de 5000 W. Cette valeur est obtenue en multipliant le courant par la tension instantanée du transformateur.

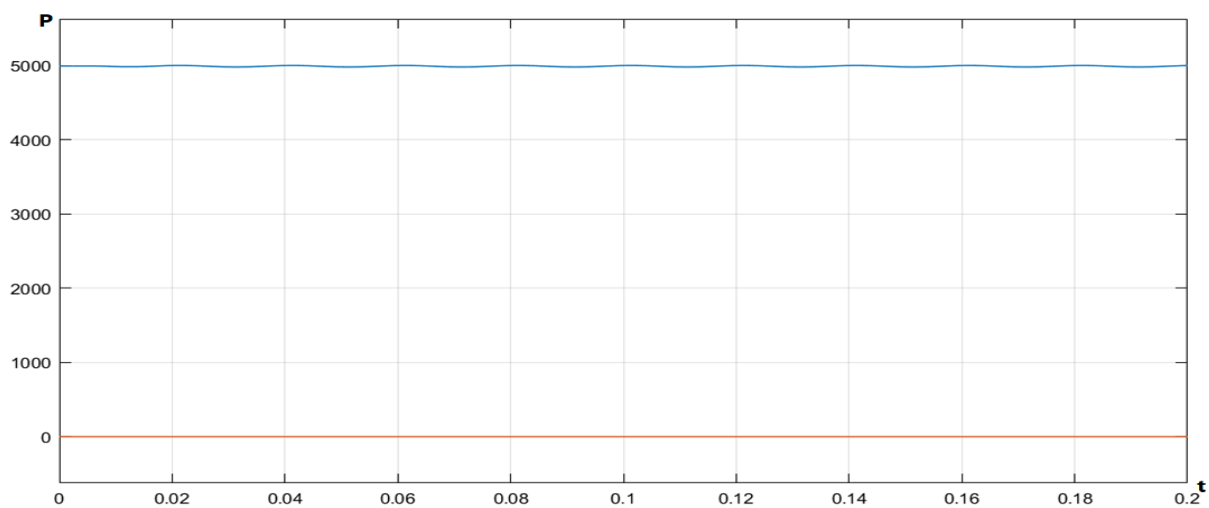


FIGURE 2.11 – : la puissance active de l'entrée du transformateur en circuit ouvert

2.4.3 Modèle en court-circuit

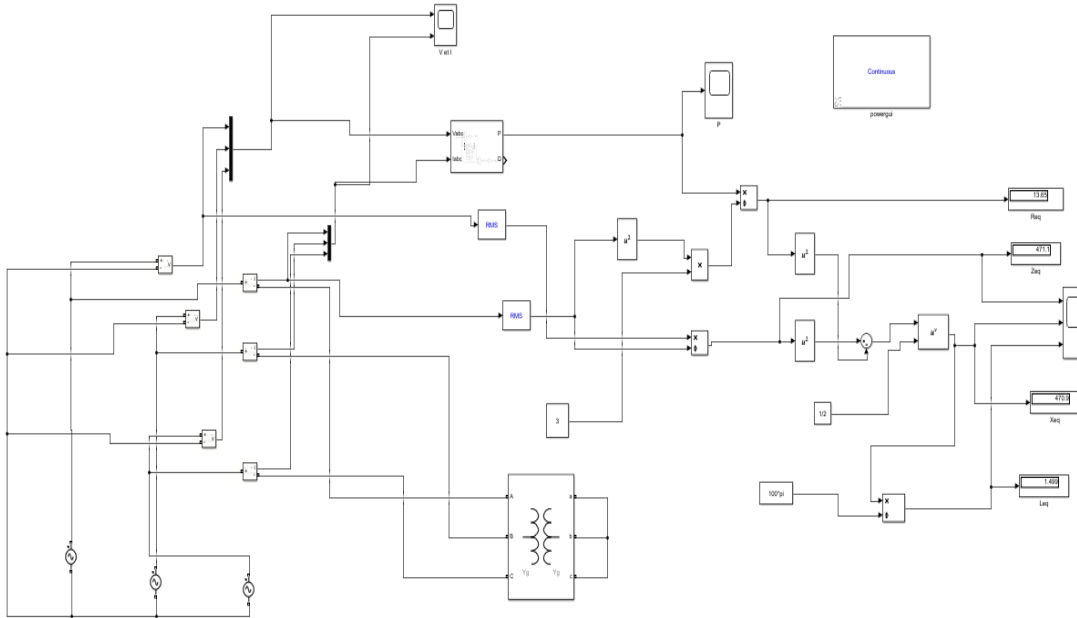


FIGURE 2.12 – : Modèle en court-circuit

2.4.3.1 Résultat de simulation en court-circuit

Pendant la simulation, on remarque une courbe sinusoïdale qui illustre la tension des phases, maintenant un niveau constant de 60 kV. Cela suggère que la tension est maintenue à son niveau optimal. Le courant mesuré dans le circuit a atteint 125 A sur une période de temps allant de 0 à 0,2 seconde, comme le montre la Figure 2.13.

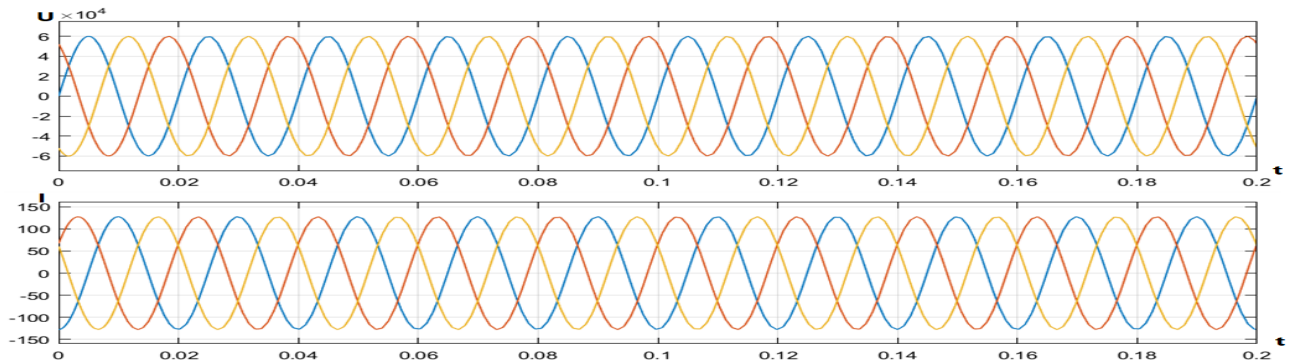


FIGURE 2.13 – : tensions et courants à l'entrée du transformateur en court-circuit

La figure 2.14 représente la puissance active en cas de court-circuit. Il est remarquable que la puissance commence par la valeur 3.4×10^5 , puis elle augmente jusqu'à 3.7×10^5 , avant de se stabiliser à la valeur 3.4×10^5 .

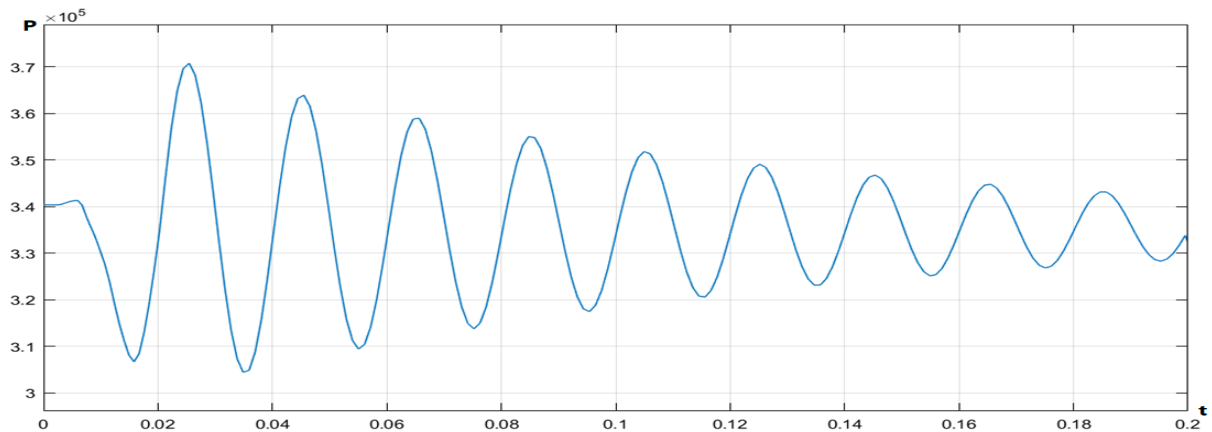


FIGURE 2.14 – : la puissance active en court-circuit à l'entrée du transformateur

2.5 Conclusion

En concluant le deuxième chapitre, nous avons examiné la modélisation d'un transformateur de puissance, en mettant l'accent sur les lois à vide et en court-circuit, ainsi que sur l'utilisation de MATLAB pour la modélisation. En étudiant minutieusement les caractéristiques et les comportements du transformateur dans ces deux conditions extrêmes, où nous avons remarqué que les courants sont les plus influents lorsqu'un court-circuit se produit, nous avons acquis une meilleure compréhension de sa réaction en l'absence de charge et lorsqu'il est court-circuité, nous permettant ainsi d'extrapoler ces résultats à des scénarios réels.

Chapitre 3

Diagnostic des Défauts d'un Système de conversion d'énergie par l'Intelligence Artificielle

3.1 Introduction

Dans notre troisième chapitre, nous allons nous pencher sur les techniques d'apprentissage automatique supervisé, en mettant l'accent sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Nous allons explorer les principes généraux de l'apprentissage automatique supervisé et nous concentrer sur l'application de cette technique dans un système de conversion d'énergie utilisant MATLAB. Nous allons ensuite analyser les résultats obtenus à partir de cette application et procéder à une interprétation approfondie de ces résultats.

3.2 Réseaux neuronaux : définitions et propriétés

Les réseaux neuronaux artificiels, également appelés réseaux connectifs, reposent sur des modèles qui tentent de reproduire les cellules du cerveau humain et leurs interconnexions. L'objectif global est d'effectuer des calculs complexes et de trouver, par le biais de l'apprentissage, une relation non linéaire entre des données numériques et des paramètres [18].

3.2.1 Neurone biologique

Le cerveau humain, constitué de deux hémisphères reliés par des connexions, pèse moins de deux kilogrammes et contient environ mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones interconnectés. Les neurones (figure 3.1) sont des cellules spécialisées dans le traitement de signaux électriques. Ils sont reliés les uns aux autres par des axones, transmettant ainsi les signaux électriques d'un neurone à un autre à travers les synapses. Les dendrites sont responsables de la réception des signaux. Le noyau de la cellule joue un rôle crucial dans le traitement des informations. [19]

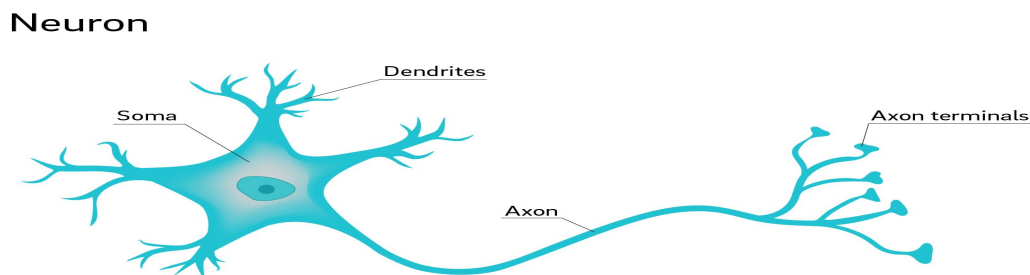


FIGURE 3.1 – : Exemple d'un neurone biologique [19]

3.2.2 Neurone formel

Le neurone formel, représenté par le Fig. 3.2, est un modèle mathématique qui s'inspire du fonctionnement des neurones biologiques. Il utilise des poids synaptiques pour pondérer la somme des entrées, contrairement aux connexions biologiques qui peuvent varier en force. Ce neurone reçoit plusieurs entrées et génère une ou plusieurs sorties en appliquant une fonction de seuil à la somme pondérée des entrées.[21]

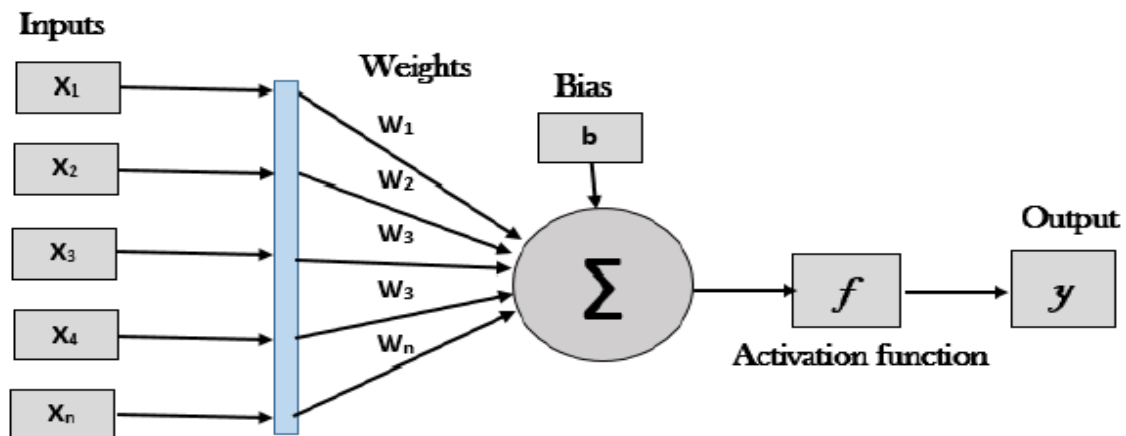


FIGURE 3.2 – : Modèle d'un neurone formel [31]

Avec :

- Les x_i sont les entrées du réseau : $x_i=1, 2, \dots, n$.
- S est le potentiel d'activation .
- Les W_i représentent les poids synaptiques (paramètres de pondération) .
- À partir de la fonction d'activation ou de seuillage (non linéaire, sigmoïde, etc....).
- y_i est la sortie du réseau telle que :

$$y = f(s); s = \sum_{i=0}^n W_i x_i + b \quad (3.1)$$

3.2.3 Création d'un système neuronal

Avant de construire un réseau de neurones, il est primordial de sélectionner avec soin les échantillons de données d'apprentissage, de test et de validation, bien avant de choisir le

type de réseau et d'ajuster les paramètres. Le choix du type de réseau intervient seulement après cette étape. Voici les quatre grandes étapes qui doivent être suivies pour créer un réseau de neurones.

3.2.3.1 Choix des échantillons

Cette étape cruciale implique la création d'une table d'apprentissage qui joue un rôle décisif en aidant le concepteur à déterminer le type de réseau le plus adapté. La présentation des échantillons influence plusieurs aspects clés :

*Le choix du type de réseau neuronal artificiel (RNA) qui convient le mieux.

*La détermination du nombre de neurones en entrée et en sortie requis pour le réseau.

*L'établissement des meilleures stratégies à suivre pour l'apprentissage, les tests et la validation.

la façon dont les échantillons sont structurés et organisés dans la table d'apprentissage est essentielle pour définir la configuration et le comportement du RNA. Cette configuration comprend le choix du type de RNA (comme un réseau de neurones convolutif ou récurrent), ainsi que le nombre de neurones d'entrée et de sortie nécessaires pour accomplir la tâche spécifique.

3.2.3.2 Elaboration de la structure du réseau

La structure du réseau neuronal dépend du type d'échantillons utilisés, ce qui influence le nombre de neurones en entrée et en sortie. Pour déterminer le nombre de couches cachées et de neurones dans chaque couche, une approche progressive est recommandée, car il n'existe pas de méthode précise. Des tests sont nécessaires pour obtenir les meilleures performances.

3.2.3.3 Apprentissage

Pendant la phase finale de développement d'un réseau de neurones, appelée phase d'apprentissage, on détermine les poids optimaux des différentes connexions en utilisant des échantillons. La rétropropagation est la méthode la plus couramment utilisée à cette étape.

3.2.3.4 Validation

La méthode de validation hors échantillon consiste à diviser l'échantillon de données en deux ensembles distincts : l'ensemble d'apprentissage et l'ensemble de validation. Le

modèle est entraîné sur l'ensemble d'apprentissage, puis évalué sur l'ensemble de validation pour mesurer ses performances sur des données inconnues. Cette méthode permet de choisir le meilleur modèle et d'estimer ses performances réelles sur de nouvelles données.

3.2.4 Apprentissage des réseaux de neurones

Après avoir établi la configuration du réseau neuronal, il est nécessaire de sélectionner une méthode d'apprentissage qui permettra d'ajuster les poids afin d'optimiser le modèle. Il est essentiel d'adapter la complexité du réseau neuronal en fonction du problème à résoudre pour obtenir une solution satisfaisante. L'apprentissage se base sur des exemples représentatifs du comportement du processus à modéliser.

L'apprentissage supervisé implique l'ajustement des poids d'un réseau neuronal en fonction d'un signal d'erreur qui représente la disparité entre la sortie réelle du réseau et la sortie désirée, lorsque cette dernière est disponible.

L'apprentissage non supervisé se caractérise par le fait que les poids du réseau ne sont ajustés qu'en fonction des signaux internes du réseau lui-même, sans utiliser de signaux d'erreur ou de sorties souhaitées. La mise à jour des poids est entièrement basée sur les signaux d'entrée.

L'apprentissage en "renforcement" se produit lorsque le réseau de neurones interagit avec son environnement. Lorsque le réseau donne une réponse satisfaisante, il est récompensé par l'environnement, tandis qu'une réponse insatisfaisante entraîne une pénalité. Par conséquent, le réseau doit découvrir les réponses qui maximisent les récompenses obtenues.

3.2.5 Application au diagnostic

Les réseaux de neurones sont des outils puissants et adaptés pour résoudre les problèmes de diagnostic, en particulier dans les tâches de classification et de détection. Grâce à leur architecture complexe et à leur capacité à apprendre à partir de données, les réseaux de neurones peuvent fournir des performances élevées dans les tâches de classification et de détection pour le diagnostic des défauts, comme notre cas c'est la détection et classification de défaut court-circuit par réseau neurones artificiel.

3.3 Présentation du système de conversion d'énergie étudié

Le système d'énergie électrique que nous présentons comprend un générateur de 60 kV, un transformateur triphasé 60 kV/30 kV d'une puissance de 32 MVA et une charge de 3,2 MW. Le générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique à une tension de 60 000 volts, puis l'électricité est acheminée vers le transformateur qui abaisse la tension à 30 kV tout en maintenant la puissance. Enfin, cette électricité est fournie à une charge de 3,2 MW, alimentant ainsi des équipements industriels ou commerciaux. Ce système permet de répondre aux besoins spécifiques du réseau électrique en assurant la transmission efficace de l'électricité sur de longues distances avec une puissance adaptée à la charge demandée.

3.4 Modélisation du système sur Matlab

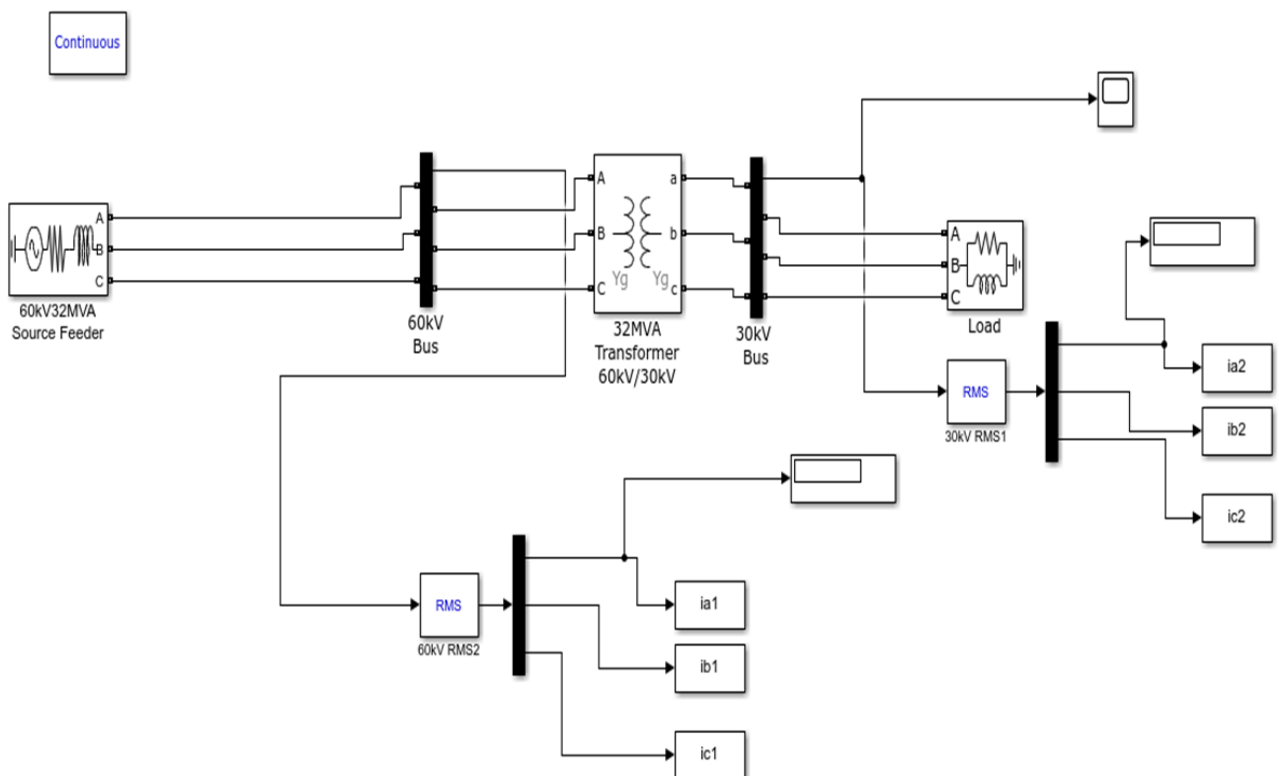


FIGURE 3.3 — : modélisation sur matlab (sumilink).

3.5 Description des composants utilisés

3.5.1 Générateur

Le générateur est l'élément central du système. Il convertit l'énergie mécanique en énergie électrique à une tension nominale de 60 kV (60 000 volts).

Block Parameters: 60kV32MVA Source Feeder

Three-Phase Source (mask) (link)
Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters Load Flow

Configuration: Yg

Source

Specify internal voltages for each phase

Phase-to-phase voltage (Vrms): 60e3

Phase angle of phase A (degrees): 0

Frequency (Hz): 50

Impedance

Internal Specify short-circuit level parameters

Source resistance (Ohms): 0.8929

Source inductance (H): 16.58e-3

Base voltage (Vrms ph-ph): 60e3

OK Cancel Help Apply

FIGURE 3.4 – Paramètres du générateur utilisés

3.5.2 Transformateur de puissance triphasé

Le transformateur triphasé est utilisé pour ajuster la tension générée par le générateur afin de répondre aux besoins spécifiques du réseau électrique. Il abaisse la tension de 60 kV à 30 kV, ce qui facilite la transmission de l'électricité sur de longues distances avec moins de pertes. Le transformateur a une puissance nominale de 32 MVA.

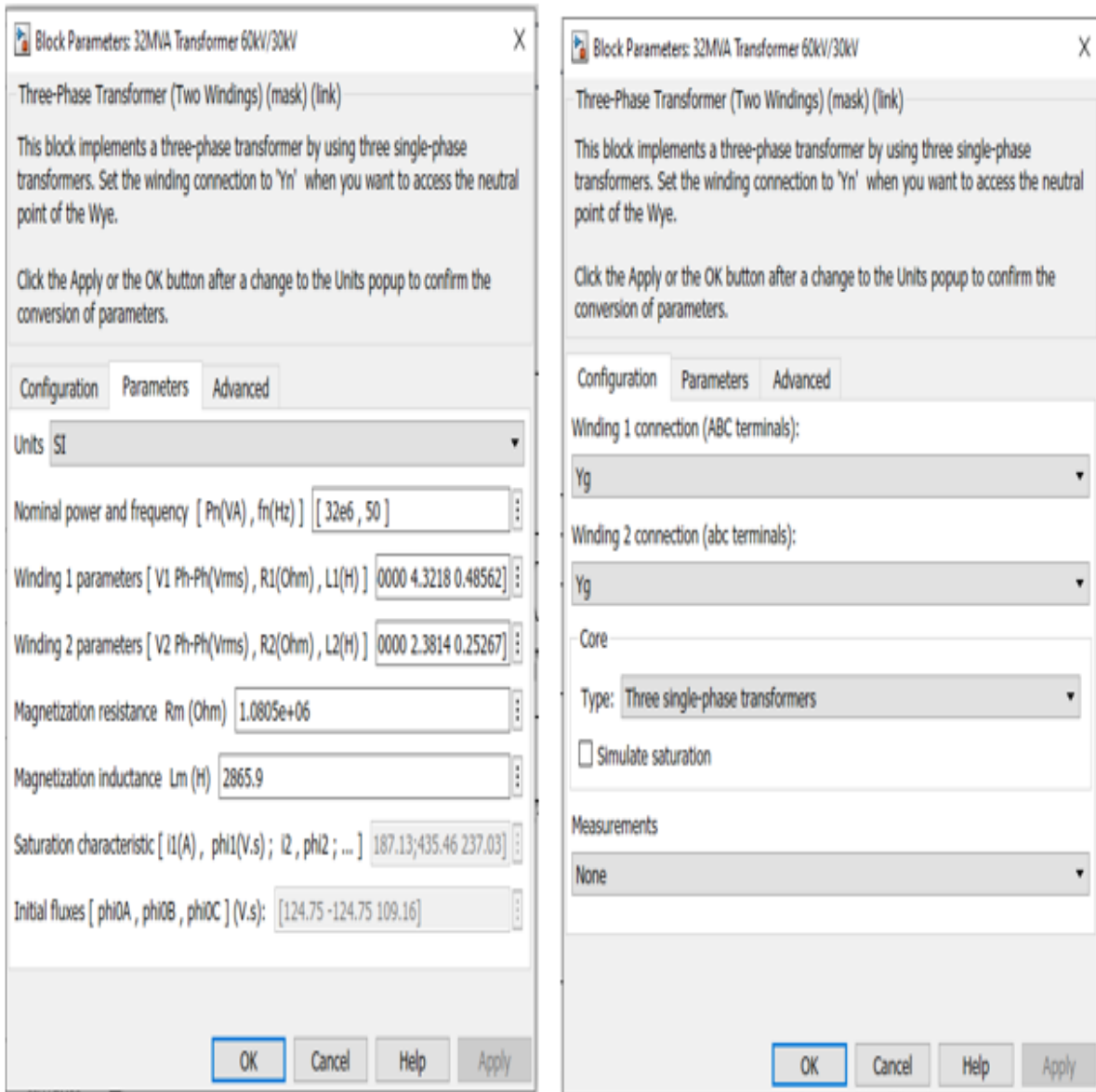


FIGURE 3.5 – : Paramètres du transformateur utilisés

3.5.3 Charge électrique

La charge représente les équipements ou les installations qui utilisent l'électricité fournie par le système. La charge dans ce système a une puissance de 3,2 MW.

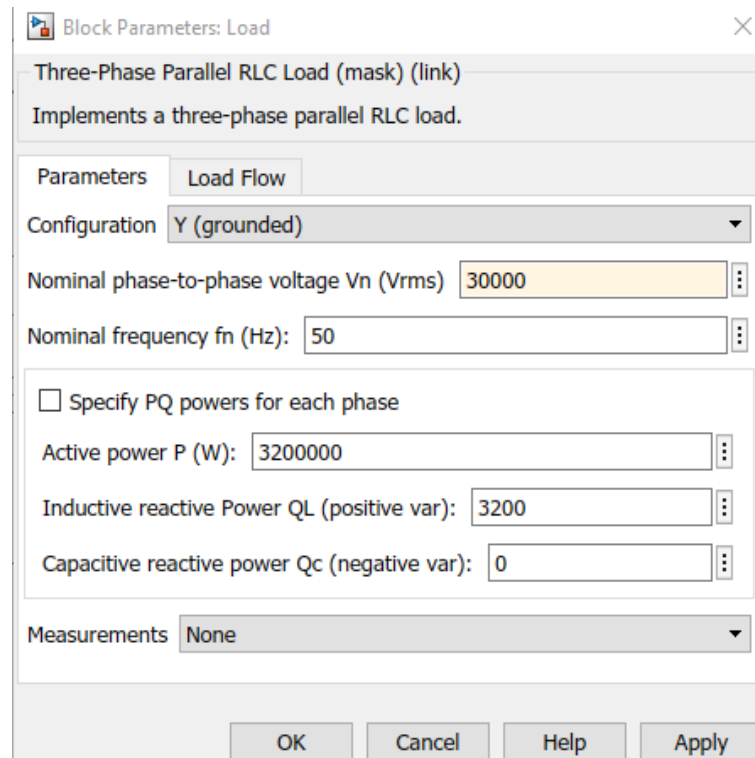


FIGURE 3.6 – : Paramètres de la charge utilisés

3.6 Utilisation des réseaux de neurones artificiels dans les systèmes de conversion d'énergie pour la détection et la classification des défauts de court-circuit

Le système de conversion d'énergie occupe une place cruciale dans le fonctionnement du système électrique en assurant le transfert efficace de l'énergie électrique de la zone source vers le réseau de distribution. Face à une demande croissante en énergie, la détection et la résolution rapide des défauts sur les lignes de transmission deviennent essentielles. La technologie de reconnaissance de formes, en particulier les réseaux de neurones artificiels (ANN) peut efficacement identifier et classer les défauts. Plusieurs modèles de défaut et algorithmes basés sur les ANN ont été développés pour simuler et reconnaître différents types de défauts, tels que les courts-circuits électriques. Les performances de ces algorithmes ont démontré des résultats prometteurs en termes de détection et de classification

des défauts. Dans notre simulation visant à détecter et classer des défauts de court-circuit dans le système de conversion d'énergie, nous avons ajouté stratégiquement deux multi-défauts de court-circuit, l'un en entrée et l'autre au sortie du transformateur. Le premier défaut représente un court-circuit dans la partie primaire du transformateur, tandis que le deuxième simule un court-circuit dans la partie secondaire ou dans les charges connectées. Cette intégration nous permet d'évaluer l'efficacité de notre système de détection et de classification des défauts et assurer une détection précise et rapide des courts-circuits.

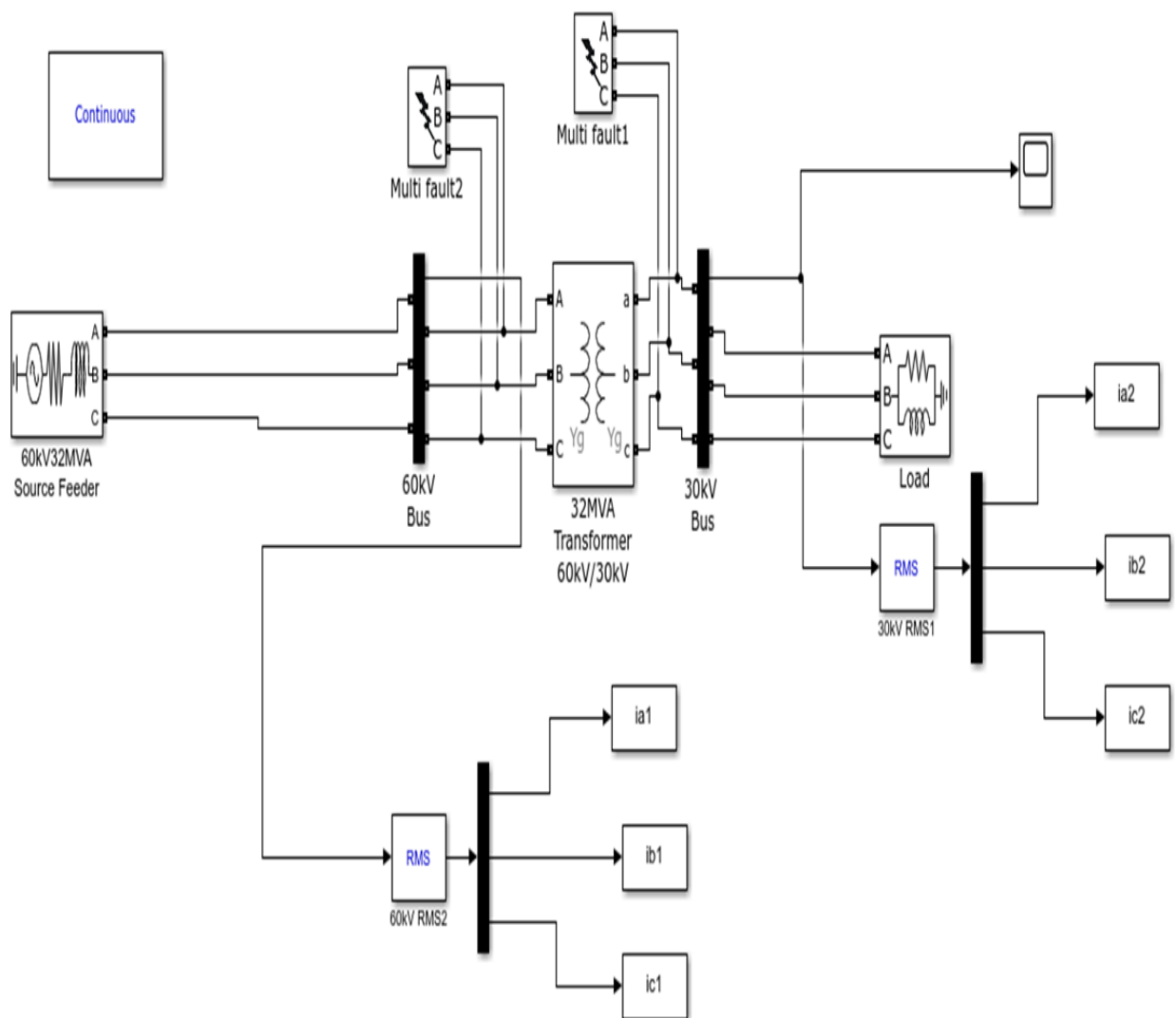


FIGURE 3.7 – : Modèle avec défaut de court-circuit

3.6.1 Description de la base de données

Nous avons mis en place un système de conversion d'énergie pour lequel nous avons réalisé des simulations. Ce système comprend un transformateur qui convertit les courants de chaque phase (i_{a1} , i_{b1} , i_{c1}) à l'entrée du transformateur en courants de chaque phase (i_{a2} , i_{b2} , i_{c2}) au sortie du transformateur. Dans le but de caractériser le comportement du système dans différentes conditions, nous avons effectué des simulations dans des conditions normales de fonctionnement, ainsi que dans diverses conditions de défaut de court-circuit. Ces conditions de défaut de court-circuit peuvent inclure des courts-circuits entre les phases ou des courts-circuits à la terre. Pendant ces simulations, nous avons enregistré les courants mesurés à la sortie du système d'alimentation. Ces données ont été collectées à des intervalles réguliers, ce qui nous a permis de recueillir un ensemble conséquent de points de données. Une fois que nous avons recueilli ces données, nous les avons étiquetées en fonction du type de défaut de court-circuit associé à chaque enregistrement. L'étiquetage des données est une étape importante pour l'apprentissage en profondeur, car il permet d'associer à chaque point de données la classe correspondante, c'est-à-dire le type de défaut de court-circuit observé.

L'objectif principal de la collecte de cette base de données est d'appliquer un apprentissage en profondeur, plus précisément un réseau de neurones artificiels (RNA), pour détecter et classifier les défauts de court-circuit.

En utilisant ces données étiquetées, nous souhaitons enseigner au réseau de neurones à reconnaître les schémas caractéristiques des différents types de défauts de court-circuit. Ainsi, lorsque le réseau sera exposé à de nouvelles données de courants mesurés, il pourra prédire avec précision le type de défaut de court-circuit présent dans le système de conversion d'énergie.

Nous avons généré une base de données en simulant le système de conversion d'énergie dans des conditions normales et de défaut de court-circuit, collecté et enregistré les courants mesurés, étiqueté les données en fonction du type de défaut de court-circuit, et notre objectif est d'utiliser un réseau de neurones artificiels pour classifier les défauts de court-circuit à partir des courants mesurés.

Pour la détection :

Entrées : [i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} , i_{a2} , i_{b2} , i_{c2}].

i_{a1} = Courant efficace dans la ligne A (à l'entrée du transformateur).

i_{b1} = Courant efficace dans la ligne B (à l'entrée du transformateur).

i_{c1} = Courant efficace dans la ligne C (à l'entrée du transformateur).

i_{a2} = Courant efficace dans la ligne A (au sortie du transformateur).

Ib2 = Courant efficace dans la ligne B (au sortie du transformateur).

Ic2 = Courant efficace dans la ligne C (au sortie du transformateur).

sorties :

"1" il existe défauts .

"0" il y'a pas défauts .

pour la classification :

Entrées de 1er défauts :

Ia1= Courant efficace dans la ligne A (a l'entrée du transformateur).

Ib1 = Courant efficace dans la ligne B (a l'entrée du transformateur).

Ic1 = Courant efficace dans la ligne C (a l'entrée du transformateur).

Entrées de 2ème défauts :

Ia2 = Courant efficace ans la ligne A (au sortie du transformateur).

Ib2 = Courant efficace dans la ligne B (au sortie du transformateur).

Ic2 = Courant efficace dans la ligne C (au sortie du transformateur).

Sorties : [S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8 S9 S10 S11 S12]

TABLEAU 3.1 – Classification des défauts avec les sorties.

Les défauts	Output											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
État sain	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AG	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BG	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CG	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ABG	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ACG	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
BCG	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ABCG	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ABC	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
AB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
AC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Etat sain : il n 'ya pas défauts.

AG : le défaut entre la phase "A" et la terre.

BG : le défaut entre la phase "B" et la terre.

CG : le défaut entre la phase "C" et la terre.

ABG : le défaut entre la phase "A,B" et la terre.

AG : le défaut entre les phases "A" et la terre.

ACG : le défaut entre les phases "A,C" et la terre.

BCG : le défaut entre les phases "B,C" et la terre.

ABCG : le défaut entre les phases "A,B,C" et la terre.

ABC : le défaut entre les trois phases.

AB : le défaut entre la phase "A" et la phase "B".

AC : le défaut entre la phase "A" et la phase "C".

BC : le défaut entre la phase "B" et la phase "C".

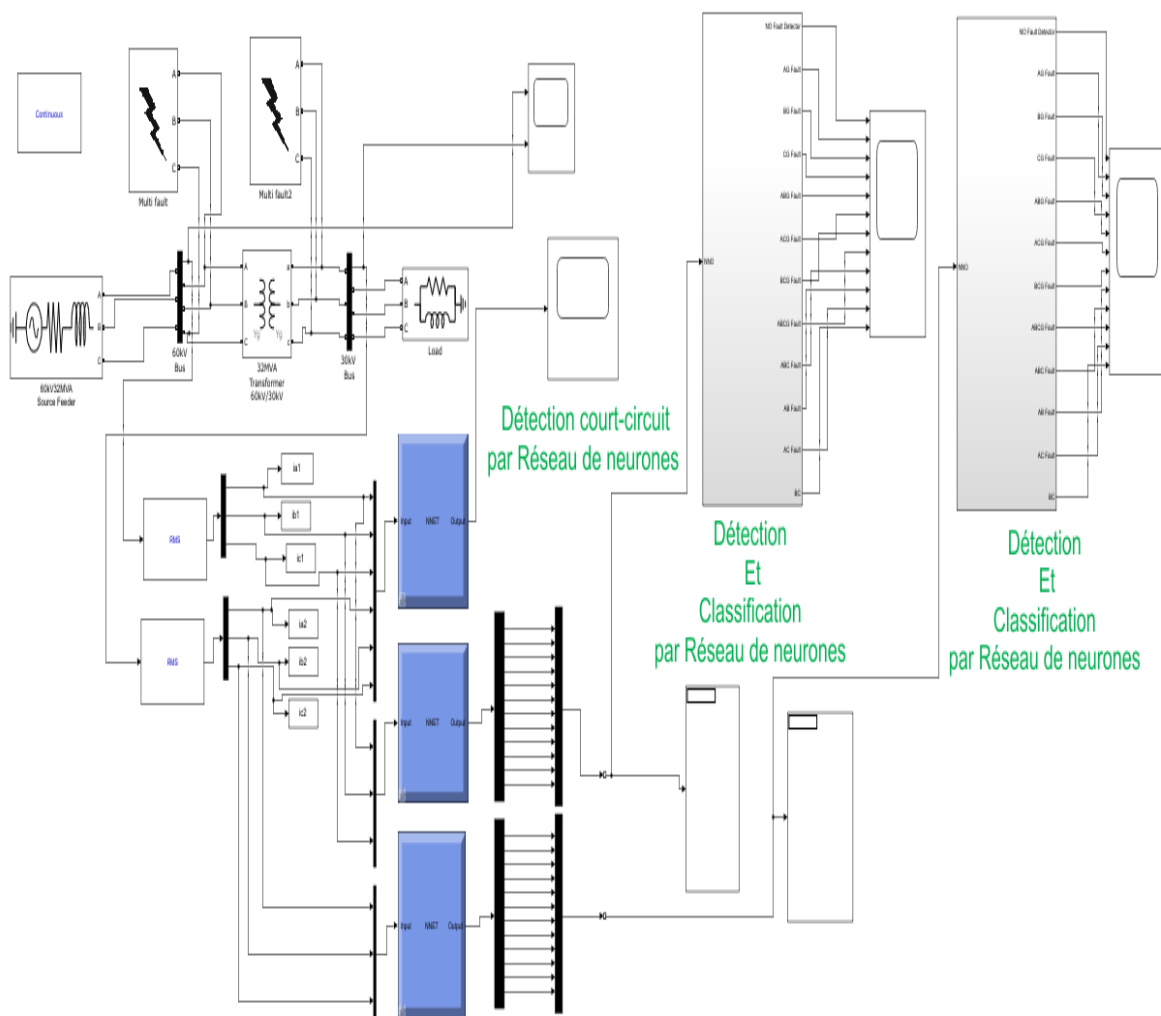


FIGURE 3.8 – : Modèle finale de détection et classification.

Le modèle (figure 3.8) est développé pour la détection et classification défauts de court-circuit par des réseaux neuronaux dans un système de conversion d'énergie .

3.6.2 Construction de RNA pour le détection et classification de défaut court-circuit sur système de conversion d'énergie

L'architecture d'un réseau de neurones artificiels (RNA) contient des couches de neurones qui traitent les données d'entrée. Les informations interviennent de la couche d'entrée à travers des couches cachées jusqu'à la couche de sortie.

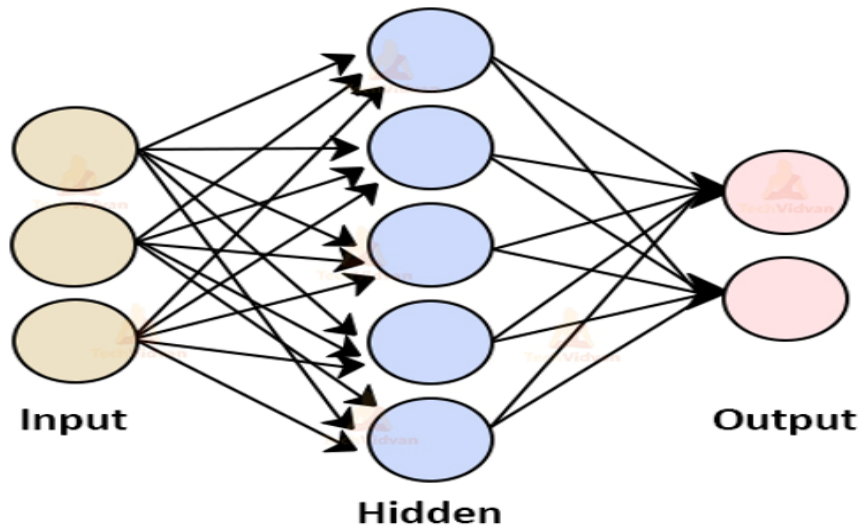


FIGURE 3.9 – : Architecture du réseau neuronal artificiel [32].

Pour le RNA que nous avons faite , il composé trois composent :

3.6.2.1 la couches des entrées de RNA

Les entrées du réseau neuronal artificiel sont les courants exprimés sous forme de valeur efficace (RMS). Nous mesurons également le courant efficace des phases afin de détecter les courts-circuits et classifier les défauts des phases : [Ia1, Ib1, Ic1, Ia2, Ib2, Ic2].

Ia1 = Courant efficace dans la ligne A (a l'entrée du transformateur).

Ib1 = Courant efficace dans la ligne B (a l'entrée du transformateur).

Ic1 = Courant efficace dans la ligne C (a l'entrée du transformateur).

Ia2 = Courant efficace dans la ligne A (au sortie du transformateur).

Ib2 = Courant efficace dans la ligne B (au sortie du transformateur).

Ic2 = Courant efficace dans la ligne C (au sortie du transformateur).

3.6.2.2 la couches des sorties de RNA

- Pour la détection de défaut :

Les sorties du réseau neuronal artificiel sont représentées par un nombre binaire [0 ou 1].

Un zéro indique l'absence de défaut, tandis qu'un un indique la présence d'un défaut.

• **Pour la classification de défaut :**

Les sorties du réseau de neurones artificiel sont des nombres binaires [0 ou 1] qui représentent les différents défauts de court-circuit indiqués dans le tableau suivant :

3.6.2.3 Fonction d'activation

Après la sortie de la couche cachée, la fonction d'activation sigmoïde est appliquée. La fonction sigmoïde transforme les valeurs d'entrée en une sortie comprise entre 0 et 1. définie par :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{3.2}$$

x est la somme pondérée des entrées du neurone ($x= w1.x1+w2.x2+w3.x3+b$).

3.6.3 Architecture de RNA utilisée

Voici une description détaillée de l'architecture du réseau neuronal artificiel (RNA) utilisée pour la détection des défauts de court-circuit :

- Le RNA est composé de 6 entrées : Ia1, Ib1, Ic1, Ia2, Ib2 et Ic2, qui représentent les différentes mesures de courant.
- Le réseau utilise 10 neurones.
- Il y a une seule couche cachée dans le réseau.
- La sortie du réseau est un seul neurone, fournissant une prédiction binaire pour la détection des défauts de court-circuit.

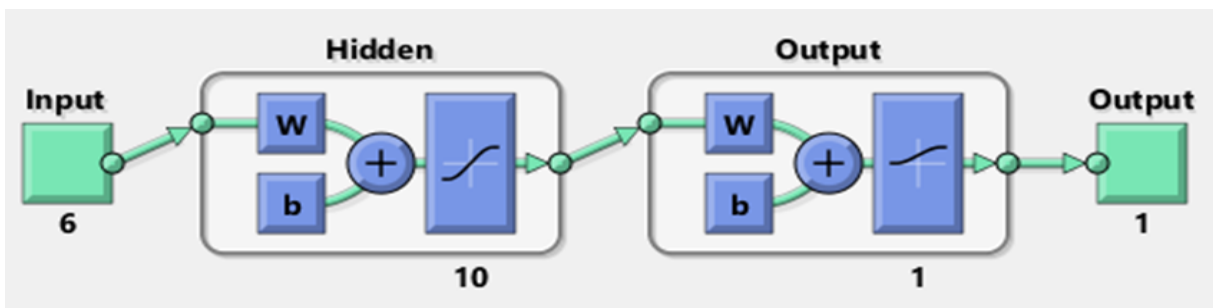


FIGURE 3.10 – : architecture de RNA pour la détection des défauts C-C .

L'architecture du réseau neuronal artificiel (RNA) pour la classification des défauts de court-circuit est définie comme suit :

le RNA est configuré avec 3 entrées (Ia1, Ib1, Ic1 pour le défaut a l'entrée du transformateur et Ia2, Ib2 et Ic2 pour le défaut au sortie du transformateur), une couche cachée contenant 10 neurones, et une sortie composée d'un vecteur de 12 classes pour la détection des défauts de court-circuit.

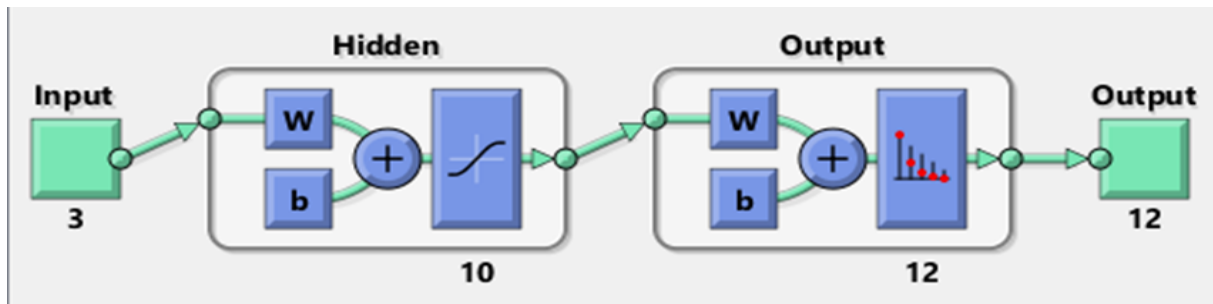


FIGURE 3.11 – : architecture de RNA pour la classification des défauts C-C .

Le type spécifique de réseau neuronal utilisé dans ce cas est appelé un réseau monocouche perceptron .

La fonction d'apprentissage est choisie en spécifiant la valeur 'trainsg'. Cette fonction utilise la rétropropagation du gradient conjugué mis à l'échelle. La taille de la couche cachée est spécifiée comme étant de 10 neurones, et la fonction d'apprentissage choisie précédemment est utilisée pour entraîner le réseau. En ce qui concerne la division des données, la fonction 'dividerand' est utilisée pour diviser les données de manière aléatoire. La valeur 'sample' est spécifiée pour "net.divideMode", ce qui signifie que chaque échantillon de données est divisé individuellement. Ensuite, les données sont divisées en ensembles d'apprentissage à 70% pour régler les poids et les biais, et en ensemble de validation et de test à 30% pour évaluer les performances finales du réseau sur des données non vues auparavant.

3.6.4 Evaluation des performances

L'évaluation d'un réseau de neurones pour la classification est une étape cruciale pour mesurer sa performance et sa capacité à détecter avec précision les classes cibles. Parmi les outils d'évaluation utilisés, on trouve l'erreur croisée entropie et la matrice de confusion. La perte d'entropie croisée binaire est définie comme suit :

$$\text{cross-entropy} = -(y * \log(\text{ypred}) + (1 - y) * \log(1 - \text{ypred}))$$

y est l'étiquette de classe réelle qui peut prendre les valeurs 0 ou 1, et ypred est la prédiction de sortie du réseau produite par la fonction sigmoïde, qui est une valeur entre

0 et 1 .

La perte d'entropie croisée binaire est utilisée pour ajuster les poids et les biais du réseau de neurones afin de minimiser la différence entre les prédictions et les étiquettes réelles.

La matrice est composée de lignes et de colonnes, où chaque colonne représente la classe réelle et chaque ligne représente la classe prédite par le modèle.

		ACTUAL VALUES	
		POSITIVE	NEGATIVE
PREDICTED VALUES	POSITIVE	TP	FP
	NEGATIVE	FN	TN

FIGURE 3.12 – : matrice de confusion .

- **Les vrais positifs (True Positives, TP)** représentent la sortie correctement classés comme positifs.
- **Les vrais négatifs (True Negatives, TN)** correspondent les sorties correctement classés comme négatifs.
- **Les faux positifs (False Positives, FP)** sont les sorties incorrectement classés comme positifs.
- **Les faux négatifs (False Negatives, FN)** sont sorties incorrectement classés comme négatifs.

Il faut lire la matrice de confusion afin de calculer les erreurs pour d'évaluation du modèle :

- **Erreur de classification** : C'est la proportion des sorties mal classés parmi tous les sorties.

Erreur de classification = (Faux positifs + Faux négatifs) / (Nombre total des sorties).

- **Exactitude (Accuracy)** : C'est la proportion totale des sorties correctement classés (positifs et négatifs) parmi tous les sorties.

Exactitude = (Vrais positifs + Vrais négatifs) / (Nombre total des sorties).

3.6.5 Évaluation et interprétation des résultats de tests

Pour obtenir de bonnes performances d'apprentissage, il est important de sélectionner judicieusement la structure du réseau de neurones. Cette architecture comprend une couche d'entrée, une couche de sortie pour prendre la décision et une couche cachée composée de 10 neurones. Dans cette architecture, la fonction de transfert utilisée pour les neurones, tant dans la couche cachée que dans la couche de sortie, est de type sigmoïde. Étant donné que les sorties du modèle sont binaires (0 ou 1) et les entrées sont des valeurs réelles.

3.6.5.1 La détection de défaut court-circuit

On utilise une base de données, 70% dédiés à l'apprentissage et 30% réservés au test et à la validation.

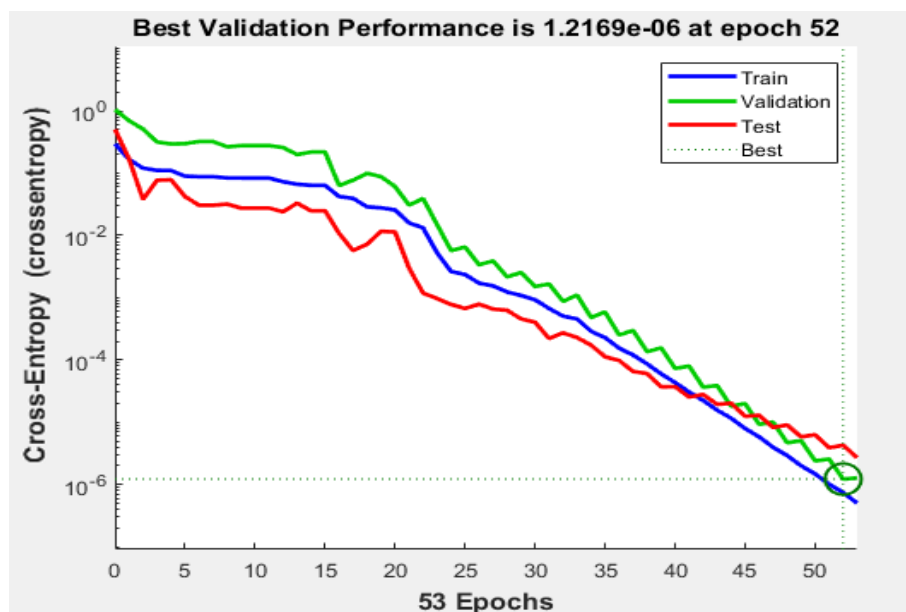


FIGURE 3.13 – : performance de RNA .

Dans la figure 3.13 , on remarque que les meilleures performances de validation sont : 1.2169e-06 sur 52 itérations. Et il est arrêté d'apprentissage sur 52 itérations à cause de son arrivée meilleure erreur d'apprentissage.



FIGURE 3.14 – : Les matrices de confusion .

Après avoir examiné la matrice de confusion de l'apprentissage, du test et de la validation pour analyser la détection du RNA, nous avons observé que les carrés verts représentent les sorties correctement classées, les carrés rouges représentent les sorties incorrectement classées, et les carrés gris indiquent que la proportion totale des sorties correctement classées est de 98,4%.

• **Test le modèle RNA :**

Nous avons ensuite testé le RNA sur d'autres ensembles de données, qu'il n'avait pas rencontrées lors de l'apprentissage, afin de confirmer l'efficacité de ce modèle. Voici la matrice de confusion pour analyser les résultats :

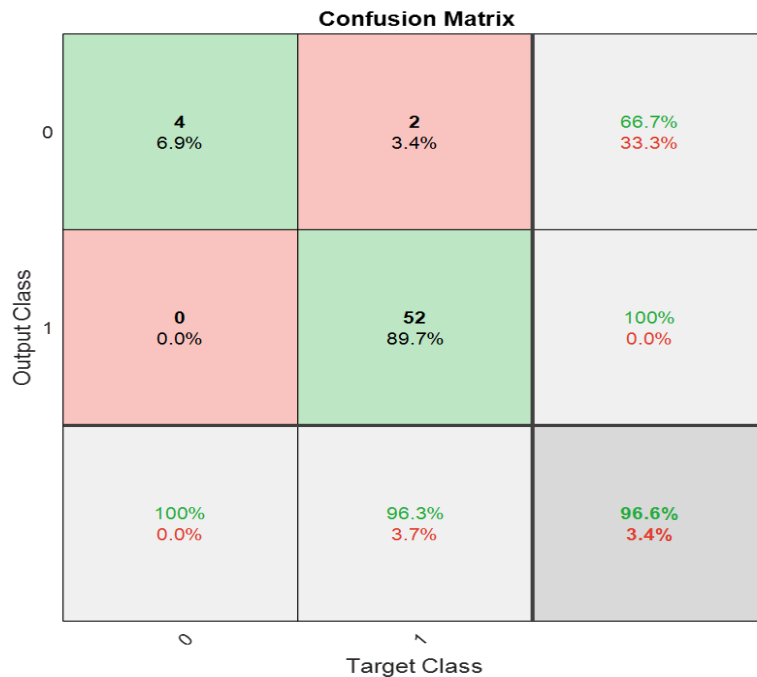


FIGURE 3.15 – : matrice de confusion du test .

*Exactitude (Accuracy) = 0.966

*Erreur de classification = 0.034

On remarque que la valeur de exactitude plus élevé (proche de 1) et erreur de classification était très proche de zéro ce qui est généralement considéré comme confirmé l'efficacité de modèle détection .

3.6.5.2 Classification des défauts de court-circuit.

Nous avons identifié deux défauts dans notre système, à savoir le défaut 1 situé avant le transformateur et le défaut 2 situé après le transformateur. Nous avons utilisé une base de données 70% pour l'apprentissage et 30% pour les tests et la validation, pour chaque défaut.

Dans les deux figures(3.16 et 3.17) , il est remarquable de constater que les performances de validation les plus exceptionnelles sont atteintes à la 152e itération pour le défaut 1 et à la 134e itération pour le défaut 2, avec des valeurs respectives de 8.6962e-05 et 1.8126e-07. Et il est arrêté d'apprentissage à cause de son arrivée meilleure erreur apprentissage .

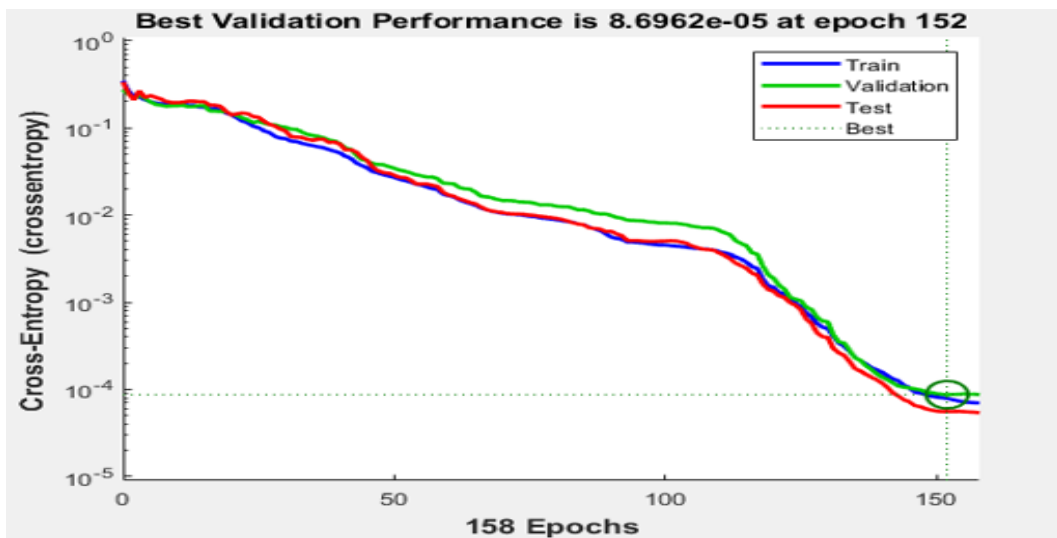


FIGURE 3.16 – : performance de RNA défaut 1.

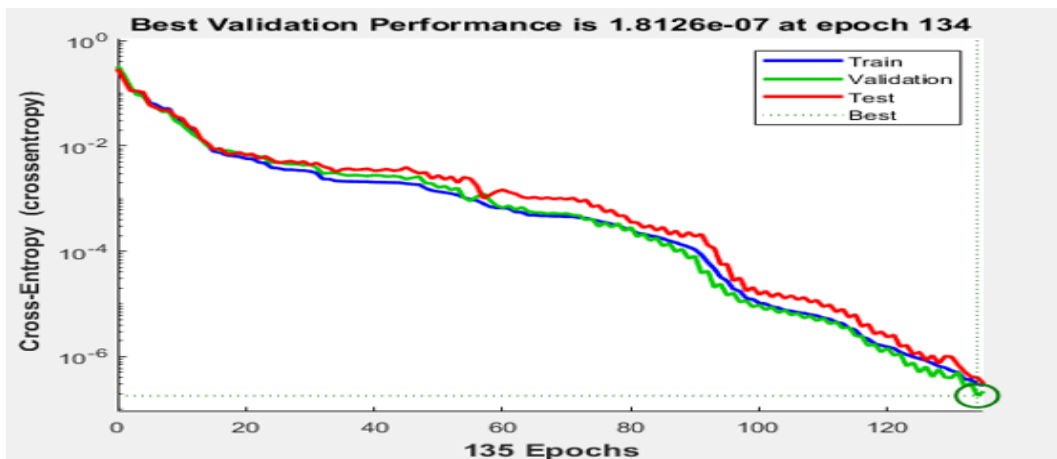


FIGURE 3.17 – : performance de RNA défaut 2 .

Après avoir effectué des tests sur d'autres bases de données, afin de vérifier l'efficacité de ce modèle RNA sur des défauts qu'il n'avait pas rencontrés lors de l'apprentissage, nous avons obtenu une matrice de confusion pour analyser les résultats :

Confusion Matrix

1	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
2	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
3	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	1 2.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	80.0%
7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3 6.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
10	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
11	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	100%
12	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	100%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	75.0%	100%	100%	100%	100%	100%	97.9%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.1%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	Target Class													

FIGURE 3.18 – : matrice de confusion de test la classification (défaut 1).

Confusion Matrix

1	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
2	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
3	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	1 2.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	80.0%
9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3 6.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
10	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
11	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	0 0.0%	100%
12	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 8.3%	0 0.0%	100%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	75.0%	100%	100%	100%	100%	97.9%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.1%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	Target Class													

FIGURE 3.19 – : matrice de confusion de test la classification (défaut 2).

Dans les deux figures (3.18 et 3.19), nous avons observé que la valeur de l'exactitude est de 0,979 (proche de 1), tandis que l'erreur de classification est presque nulle (0,021), ce qui confirme généralement l'efficacité du modèle de classification pour le défaut 1. De même, pour la classification du défaut 2, on constate une exactitude proche de 1 et une erreur de classification proche de zéro, ce qui confirme l'efficacité du modèle de classification pour le défaut 2.

3.6.6 Test le modèle sur Matlab (Simulink)

3.6.6.1 Pour le défaut 1 (a l'entrée du transformateur)



FIGURE 3.20 – : résultat de simulation de modèle Matlab

Dans ce premier cas, il n'y a pas eu de création de défauts entre les différentes phases (ABC) sur le premier bloc qui contient plusieurs défauts. Nous allons simuler le modèle pour vérifier les résultats.

(La figure 3.20) représente un graphique utilisé pour détecter et classifier les courts-circuits. Dans ce graphique, la valeur 0 indique l'absence de cette classe, tandis que la valeur 1 indique sa présence. Dans cette situation, l'afficheur de détection et de classification des défauts passera à 1 pour la classe 1 (qui correspond au détecteur sans défaut), ce qui signifie qu'aucun défaut n'a été détecté dans le système.

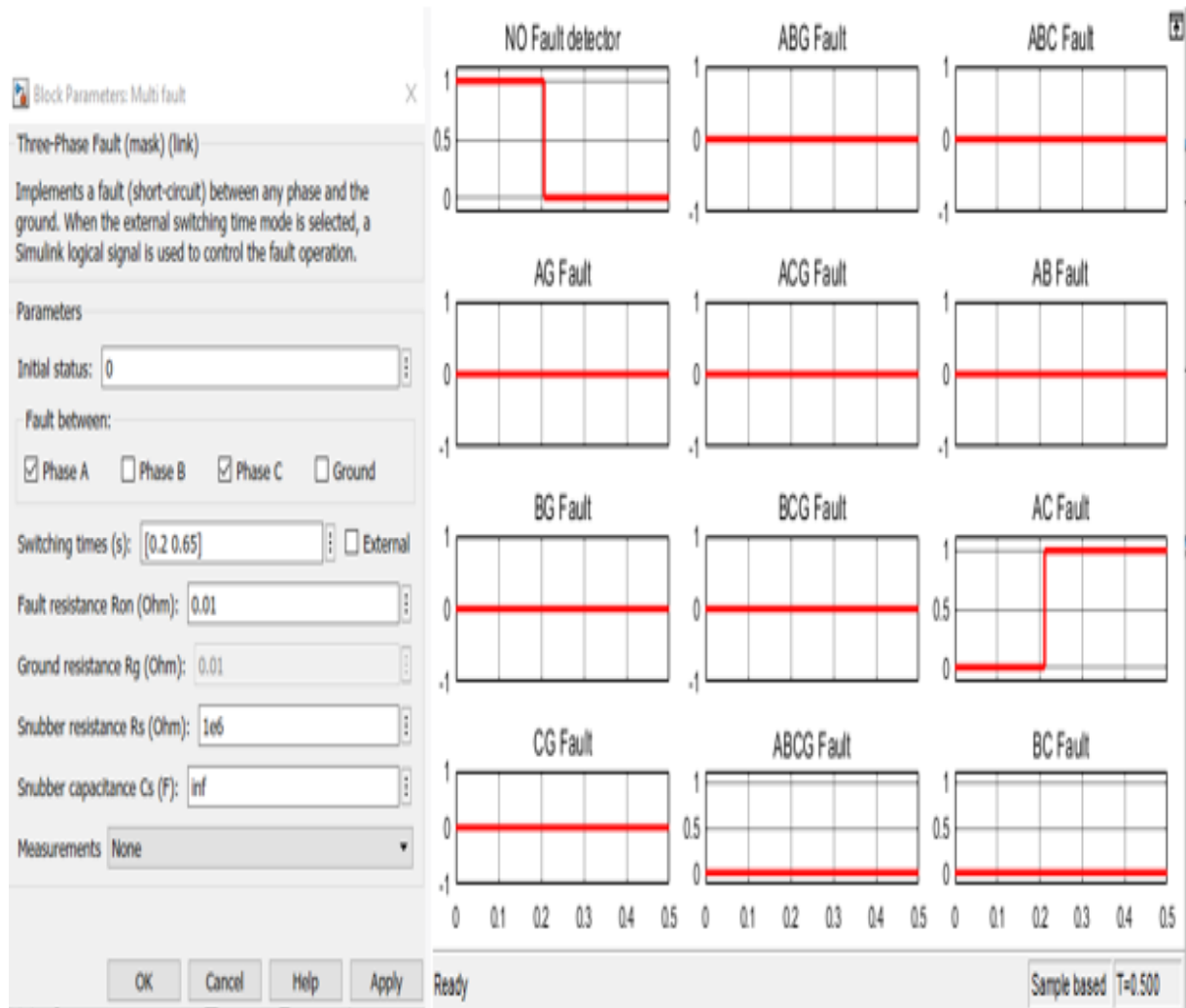


FIGURE 3.21 – : résultat de simulation de modèle défaut (AC).

Dans le deuxième cas (figure 3.21), il est possible d'observer qu'avant la simulation, nous avons intentionnellement introduit un défaut entre les phases A et C, dans la plage de temps allant de 0,2 à 0,65 seconde, sur le premier bloc de plusieurs défauts. Après une simulation d'une durée de 0,5 seconde, le défaut est détecté et classifié. L'afficheur de la classe 1, qui indique l'absence de défaut, passe de 1 à 0 après 0,2 seconde. Vous avez donc noté que la classification des défauts passe de zéro à un. Par conséquent, nous classifions ce défaut spécifique comme étant un défaut AC.

3.6.6.2 Pour le défaut 2 (au sortie du transformateur)



FIGURE 3.22 – : résultat de simulation de modèle Matlab

Dans ce cas (figure 3.22), nous n'avons pas créé de défaut entre les phases (ABC) sur le deuxième bloc, malgré la présence de plusieurs défauts. Dans cette situation, l'afficheur de détection et de classification des défauts indiquera 1 pour la classe 1 (détecteur sans défaut), ce qui confirme l'absence de tout défaut détecté dans le système.

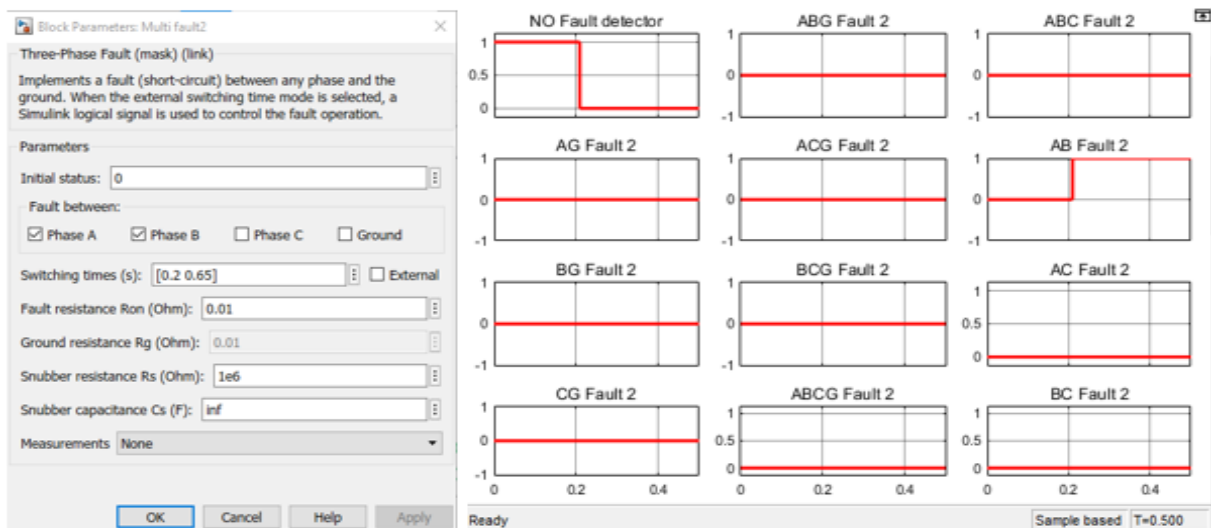


FIGURE 3.23 – : résultat de simulation de modèle Matlab défaut (AB).

Dans ce cas, un défaut s'est créé entre la phase A et B dans le deuxième bloc parmi plusieurs défauts. L'afficheur de détection et de classification des défauts indiquera 1 pour la classe 10 (défaut AB), confirmant ainsi la présence d'un défaut AB détecté dans le système.

3.7 Conclusion

Ce chapitre présente l'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour diagnostiquer les défauts de court-circuit dans les systèmes de conversion d'énergie. Deux architectures de RNA sont proposées : une pour détecter les défauts et une autre pour classifier les défauts. Les performances du modèle sont évaluées à l'aide de la matrice de confusion, qui démontre des résultats satisfaisants avec une précision élevée et une faible erreur de classification. Les tests effectués sur des bases de données indépendantes ainsi que les simulations réalisées dans MATLAB confirment l'efficacité du modèle en matière de détection et de classification précises des défauts de court-circuit.

Conclusion Générale

les systèmes de conversion d'énergie sont des dispositifs essentiels pour répondre à nos besoins énergétiques dans divers secteurs tels que la production d'électricité, les transports et l'industrie. Parmi les composants clés de ces systèmes, les transformateurs jouent un rôle crucial en adaptant les niveaux de tension pour maintenir la puissance constante. Cependant, les courts-circuits peuvent entraîner des conséquences néfastes sur le fonctionnement de ces systèmes.

Un court-circuit se produit lorsque le courant électrique prend un chemin non prévu, ce qui entraîne une augmentation soudaine du courant. Cela peut provoquer des risques tels que la surchauffe, les étincelles, les perturbations dans la transmission de l'électricité et même des dommages matériels. Pour éviter ces effets néfastes, il est crucial de détecter et de classer rapidement les défauts de court-circuit.

Une approche prometteuse pour diagnostiquer les défauts de court-circuit consiste à utiliser un modèle de réseau de neurones artificiels. Les réseaux neuronaux sont capables de détecter la présence d'un court-circuit et de classer précisément le type de défaut. En utilisant des techniques d'apprentissage automatique, ces modèles peuvent être formés à partir de données d'entrée comprenant des schémas de tension et de courant, des caractéristiques du système et des informations sur les défauts précédemment observés.

Les évaluations réalisées ont démontré que ces modèles de réseau de neurones artificiels sont capables de détecter et de classer les défauts de court-circuit avec une grande précision. Leur utilisation améliore ainsi la fiabilité et la sécurité des systèmes de conversion d'énergie. En identifiant rapidement les courts-circuits et en prenant des mesures appropriées, il est possible de minimiser les risques potentiels et d'éviter les conséquences dommageables pour les installations et les personnes concernées.

l'application des modèles de réseau de neurones artificiels pour le diagnostic des défauts de court-circuit dans les systèmes de conversion d'énergie représente une avancée significative en matière de sécurité et de fiabilité. Ces modèles permettent une détection précise des courts-circuits et une classification efficace des défauts, ce qui permet de prendre des mesures correctives rapides et de prévenir les conséquences néfastes. Cette approche ouvre la voie à de nouvelles possibilités pour améliorer la gestion des systèmes de conversion d'énergie et assurer un fonctionnement optimal dans divers domaines d'application.

Bibliographie

- [1] John Doe, Jane Smith "Renewable Energy Sources : Their Global Impact and Sustainable Future" ,2022.
- [2] Azevedo, I. L., Morgan, M. G. (2009). The transition to solid-state lighting. Proceedings of the IEEE, 97(3), 481-510.
- [3] "Principles of Electric Machines and Power Electronics" par P.C. Sen,1997.
- [4] IEC 60076-1. (2000). Transformateurs de puissance - Partie 1 : Généralités.
- [5] Formation transformateur "Formation transformateur de puissance".
- [6] FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005.
- [7] A.CAPLIEZ P.HEINY. "Technologie et schéma" tome 2.
- [8] HOCHART, B. (1988). Le transformateur de puissance. Technique et Documentation (Lavoisier).
- [9] CIGRE TB 445. (2011). Guide for Transformer Maintenance.
- [10] SONELGAZ-ALGÉRIE, "Documentation des accessoires".
- [11] AMARI. Mansour, Cours Electrotechnique : "TRANSFORMATEUR TRIPHASE ".
- [12] Jean Sanchez : "Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance". Autre.Université de Grenoble, 2011. Français. <NNT : 2011GRENT031>. <tel-01017179>.
- [13] Cahier de charge de la SONELGAZ, "Doctrines de la maintenance des transformateurs ".
- [14] Anthony Lefèvre. "Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires. Energie électrique. "Université de Nantes, 2006. Français.
- [15] Mezari Naouel "Diagnostic des transformateurs de puissances " Mémoire de master.
- [16] International Electrotechnical Commission Standards (IEC), " Power transformers - Part 11 : Drytype transformers". IEC 60076-1, Edition 2.12000-04.

- [17] J. Mitra, " Advanced transformer modeling for transients simulation " , Departement of Electrical and Cmputer Engineering, North Dakota state University, Fargo, North Dakota 58105, July 21, 2003.
- [18] M. Boudjedaimi, "Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels " , mémoire de Magister, Mouloud Mammeri, Tizi Ouzo, 2009.
- [19] <https://urlz.fr/mfhM> .
- [20] <https://www.researchgate.net/figure/The-biological-neuron-42-The-formal-neuro>.
- [21] A. Zahir, "Identification des systèmes non linéaires par les réseaux de neurones " , mémoire de master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia ,2017.
- [22] M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI : "Machines électriques" , Tome I, éditions MIR, Moscou, 1976.
- [23] IMEN ZINE, " Les énergies renouvelables devraient devenir la norme dans le monde " , A la une ,Environnement , Avril 11, 2022. <https://urlz.fr/mfhu>
- [24] darlannelauracamille, "Les énergies non renouvelables utilisées pour produire de l'électricité. " <https://urlz.fr/mfhw>
- [25] Aurélie Hubert, <https://urlz.fr/jSmQ>
- [26] CEI 60076-1, clause 3.3.1, version 2011 <https://urlz.fr/mfhC>
- [27] Dr. Mohamed ZELLAGUI , " Protection Transformateur de Puissance " , <https://urlz.fr/mfhF>
- [28] <https://urlz.fr/mfhH>
- [29] <https://urlz.fr/mfhJ>
- [30] " transformateurs " ,ENSM, sept 21, 2014 <https://urlz.fr/mfhP>
- [31] Ikram Chraïbi Kaadoud, " Reprenons les bases : Neurone artificiel, Neurone biologique" , oct 08, 2018 <https://urlz.fr/mfhS>
- [32] TechVidvan "Artificial Neural Network – Applications, Algorithms and Examples" , <https://urlz.fr/mggf>
- [33] M.Kostenko et L.Piotravski, " Machines électriques " , 3eme Edition Mir.Moscou, traduit du russe Ch.Bir, 1979.
- [34] A.Ivanov et Smokenski, "Machines électriques " , 3eme Edition Mir.Moscou, traduit du russe par V.Koliméev, 1983.
- [35] Dang.Van.Dao et Truong Tringo, " Etude expérimentale des caractéristiques du transformateur triphasé ". Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'études universitaires appliquées D.E.U.A en électronique. Centre universitaire O.E.B Juin 1993.

Annexe A

Interface graphique

A.1 Système de détection et classification les défauts de court-circuit d'un système de conversion d'énergie

Cette interface permet de détecter et classifier les défauts de court-circuit à l'aide de réseaux de neurones artificiels.

Cette interface a été créée en utilisant "app-designer" dans Matlab. comme montre la figure 1.

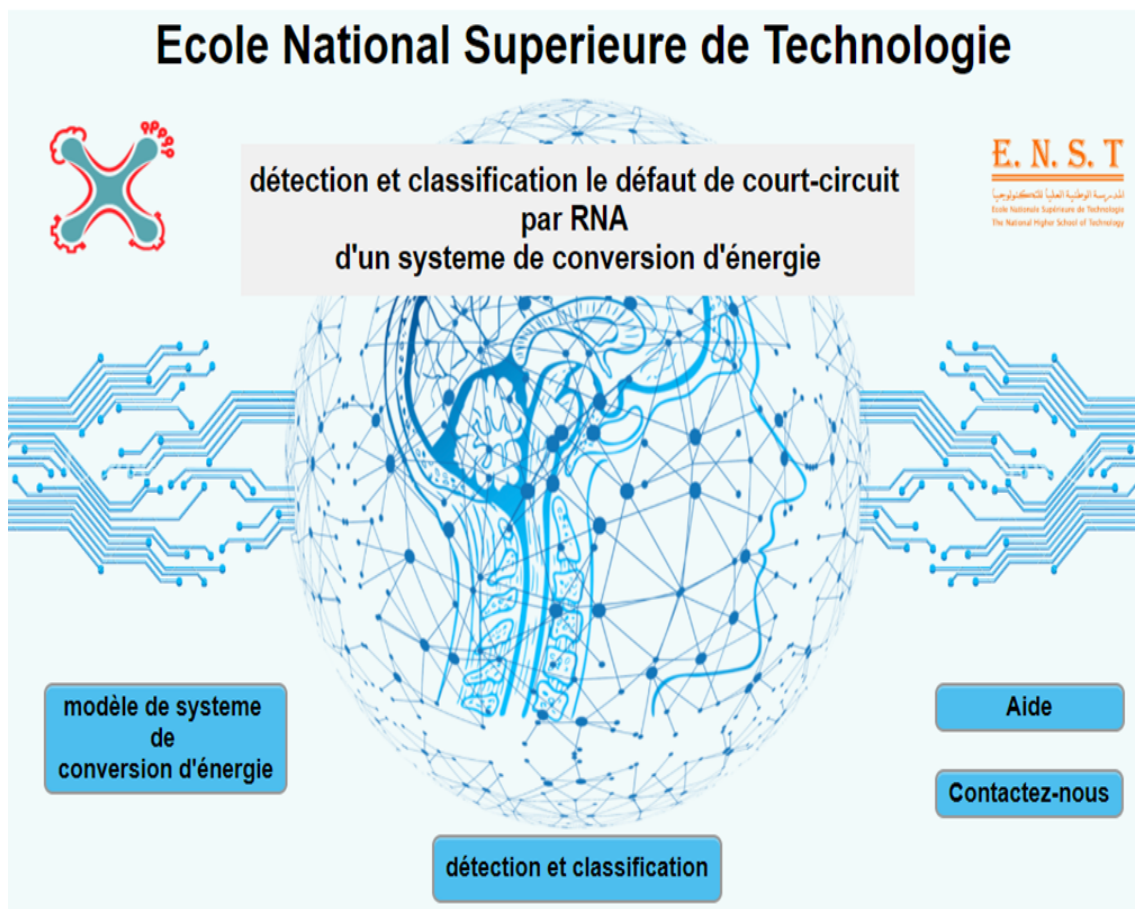


FIGURE A.1 – : Interface graphique développé sur MATLAB.

La page principale de l'interface présente quatre boutons.

le **premier bouton** permet d'accéder à la modélisation du système étudié en utilisant Matlab Simulink. Ce modèle comprend les paramètres spécifiques de chaque composant, comme illustré dans la Figure A.2.

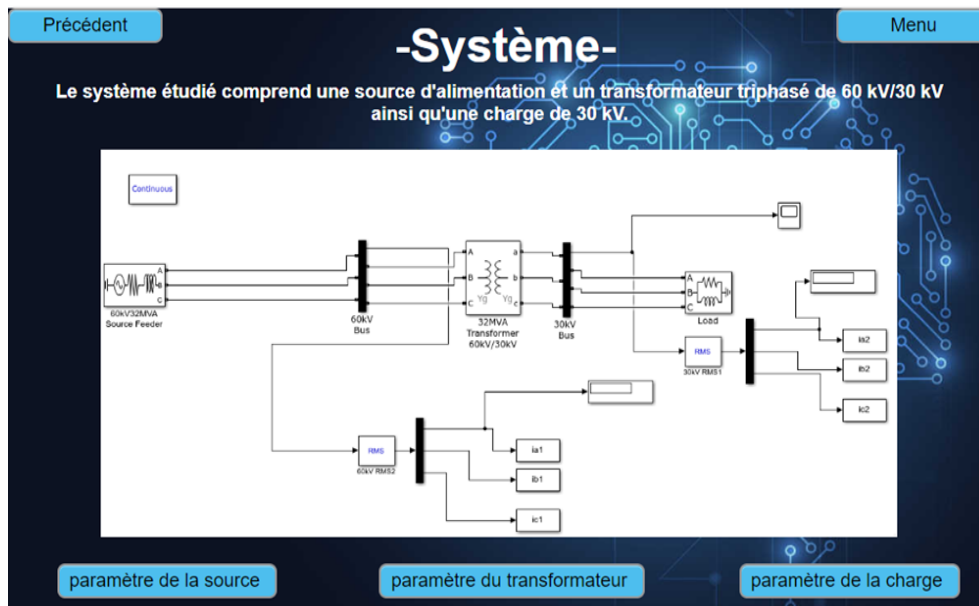


FIGURE A.2 – : modélisation de système étudié avec matlab (simulink).

Les paramètres de chaque composants :

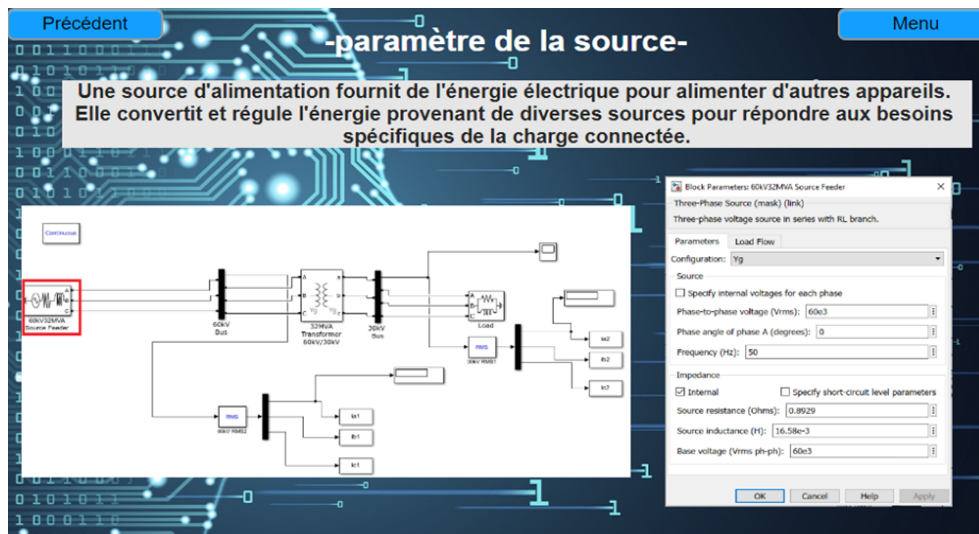


FIGURE A.3 – : Paramètre de la source dans l'interface.

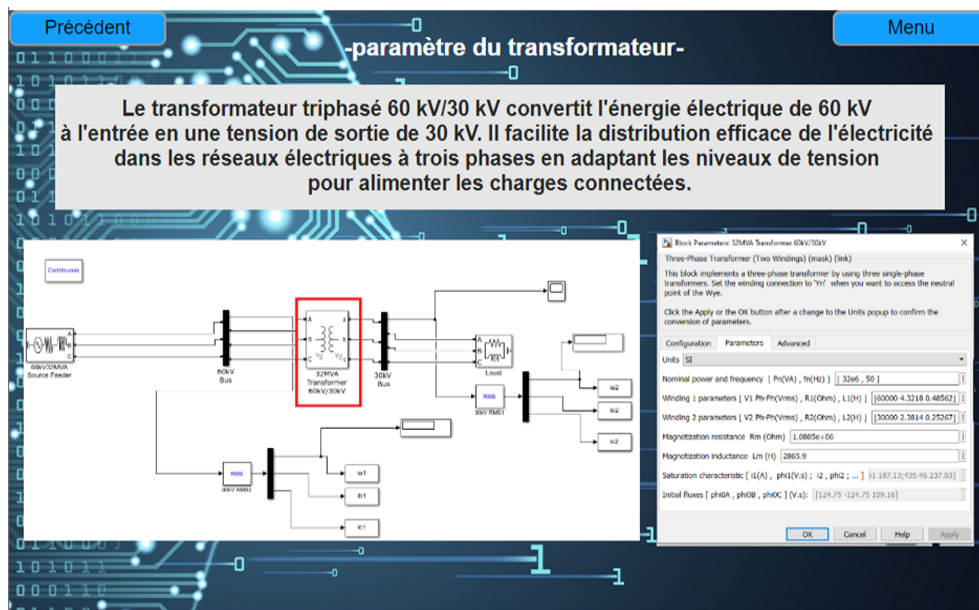


FIGURE A.4 – : Paramètre du transformateur dans l'interface .

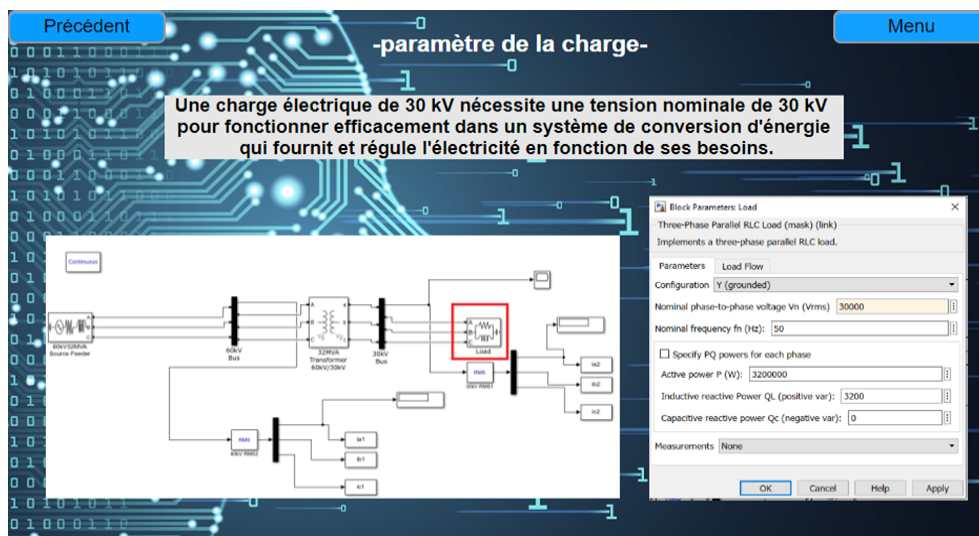


FIGURE A.5 – : Paramètre de la charge dans l'interface .

Le deuxième bouton donne accès à une interface spécifique permettant d'obtenir une vision des paramètres de RNA ainsi que de détecter et classer les défaut. (figure A.6)

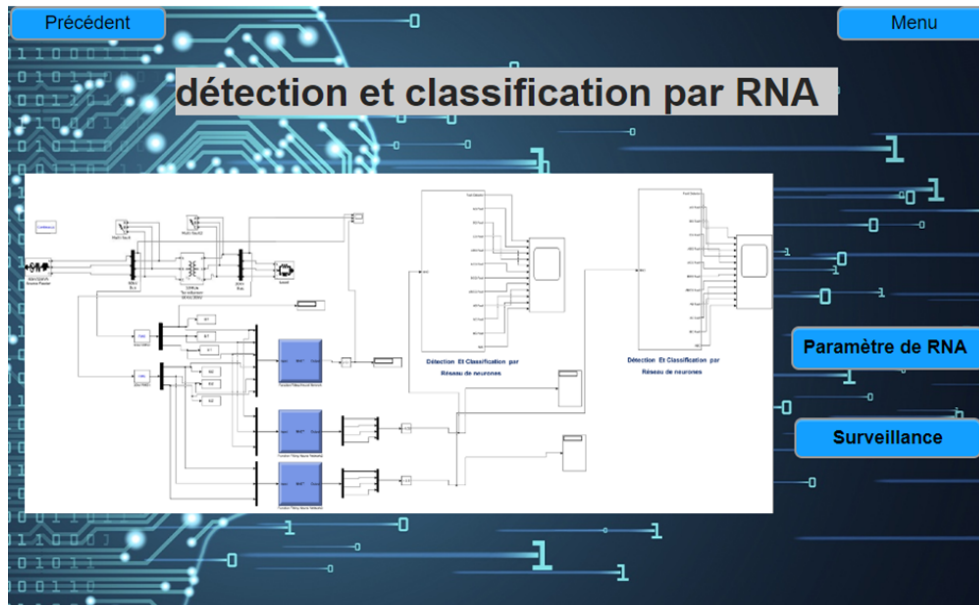


FIGURE A.6 – : détection et classification .

Les défauts	input			Output											
	la	lb	lc	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Etat sain	[72 ;73]	[72 ;73]	[72 ;73]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AG	[20 ;40]	[72 ;73]	[72 ;73]	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BG	[72 ;73]	[20 ;47]	[72 ;73]	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CG	[72 ;73]	[72 ;73]	[20 ;22]	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ABG	[2 ;37]	[2 ;34]	[72 ;73]	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ACG	[2 ;36]	[72 ;73]	[0.7 ;32]	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
BCG	[72 ;73]	[19 ;20]	[20 ;22]	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ABCG	[2 ;37]	[1 ;34]	[1 ;39]	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ABC	[150 ;360]	[150 ;360]	[150 ;360]	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
AB	[159 ;380]	[159 ;380]	[72 ;73]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
AC	[159 ;380]	[72 ;73]	[159 ;380]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
BC	[72 ;73]	[159 ;380]	[159 ;380]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

FIGURE A.7 – : Paramètre de RNA utilisé.

Nous avons conçu cette interface afin de détecter et classifier les erreurs. Une fois que les courants (I_a , I_b et I_c) sont saisis, le programme utilisé (RNA) active la lampe qui s'allume et affiche la classe du défaut détecté. (figure A.8).

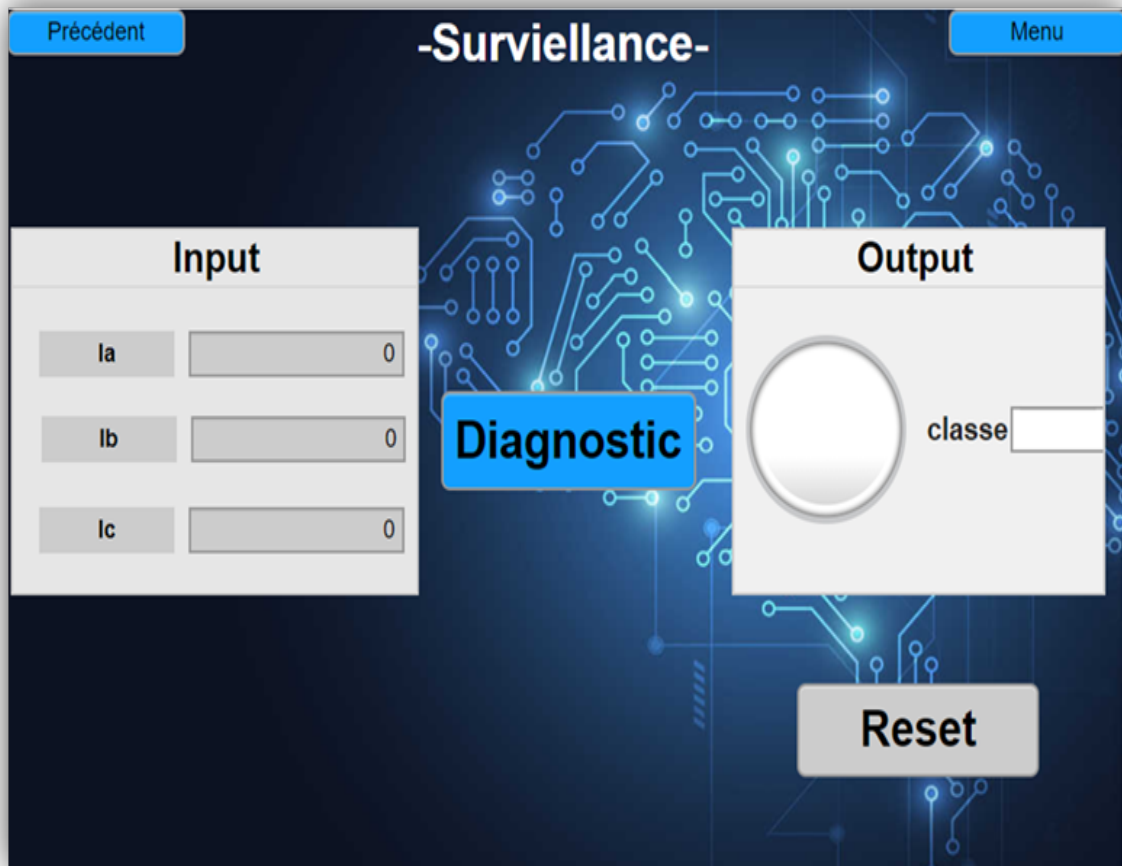


FIGURE A.8 – : détection et classification le défaut de court-circuit dans l'interface.

Si la lampe s'allume en vert, cela indique l'absence de défaut et il affiche la classe "sain" comme illustré dans la figure A.9.

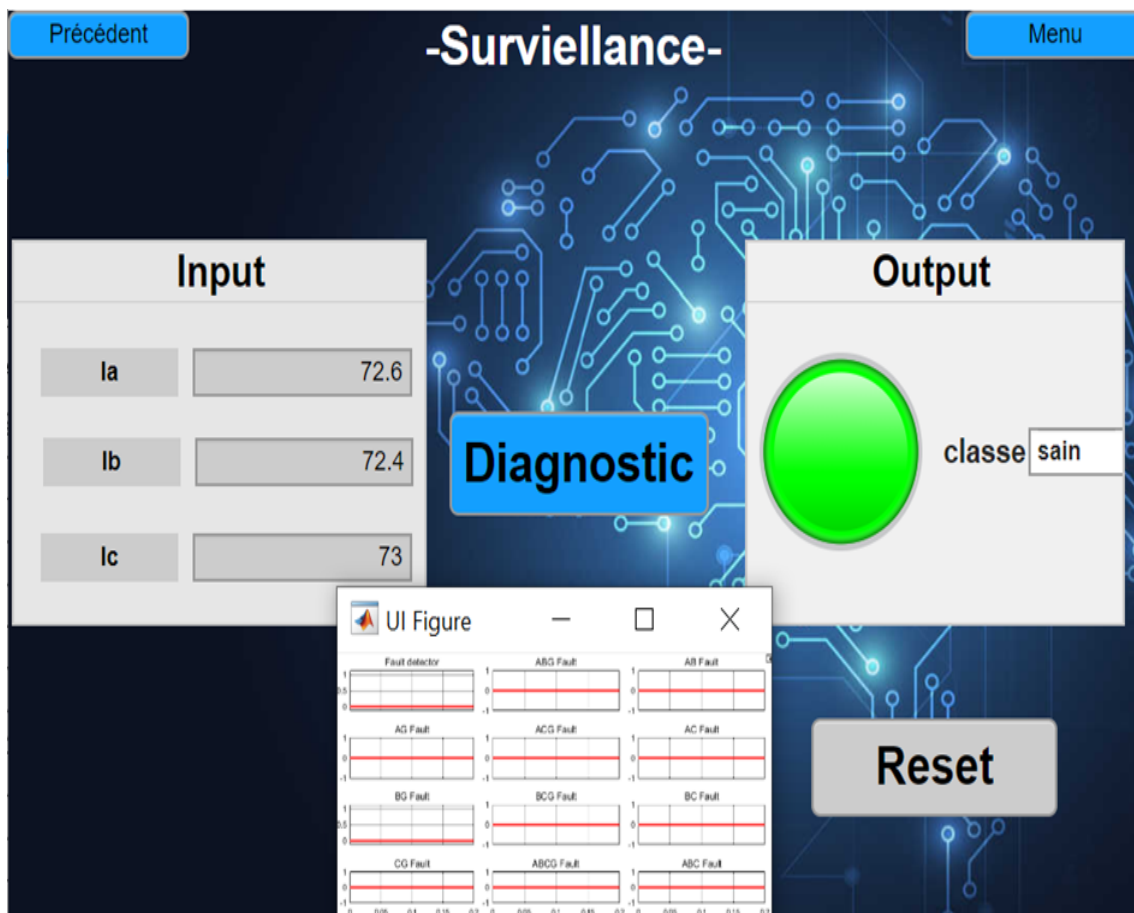


FIGURE A.9 – : La surveillance sous l'interface graphique en état sain.

Lorsque la lampe émet une lumière rouge, cela signifie qu'il y a un court-circuit et qu'elle affiche la classe de ce défaut (référez-vous à la figure A.10 , A.11 et A.12).

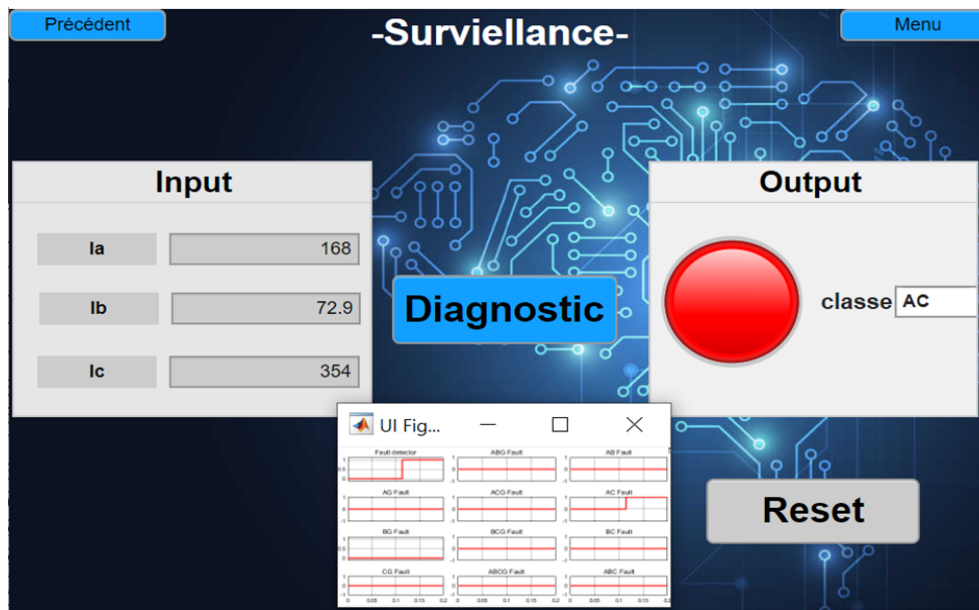


FIGURE A.10 – : La surveillance sous l'interface graphique en défaut AC.

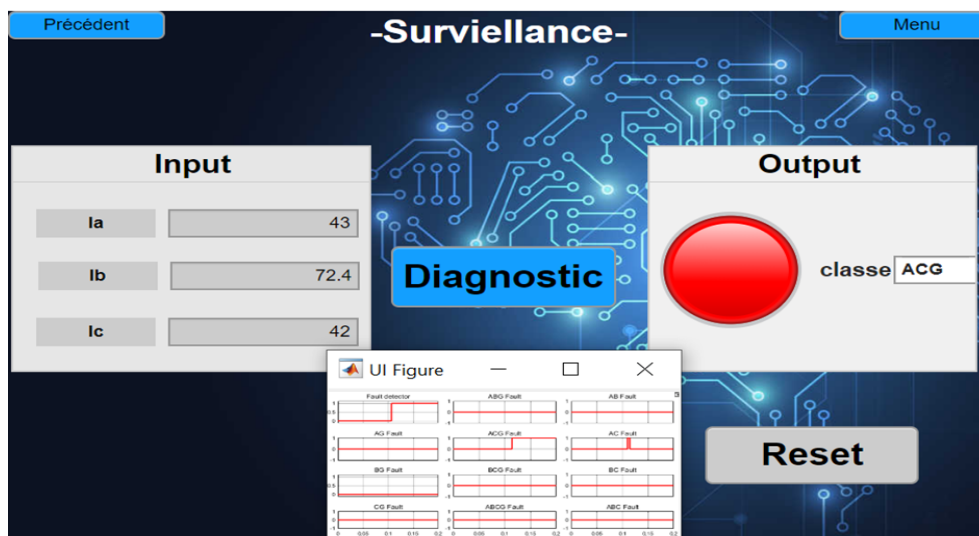


FIGURE A.11 – : La surveillance sous l'interface graphique en défaut ACG .

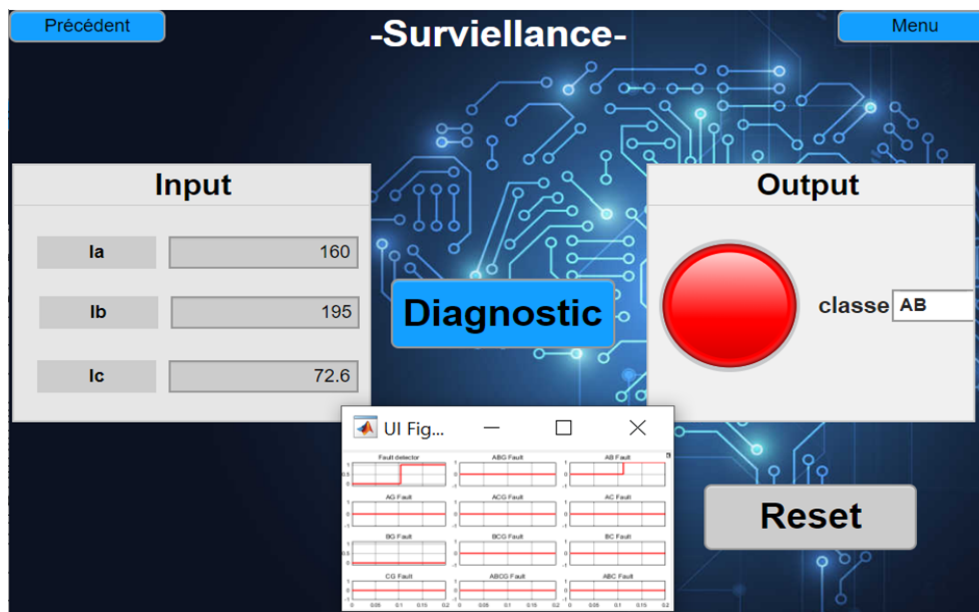


FIGURE A.12 – : La surveillance sous l’interface graphique en défaut AB.

Si les valeurs des courants (I_a , I_b et I_c) sont indéterminées ou incohérentes, la lampe émettra une lumière bleue et affichera un symbole "!" (voir Figure A.13).



FIGURE A.13 – : La surveillance sous l’interface graphique en cas des données erronées.

Le troisième bouton "Aide", offre à l'utilisateur la possibilité d'accéder au guide d'utilisation de l'application.

Le quatrième bouton "Contactez-nous", offre à l'utilisateur la possibilité d'entrer en contact avec l'éditeur de l'application. Vous pouvez le repérer sur la figure A.14.

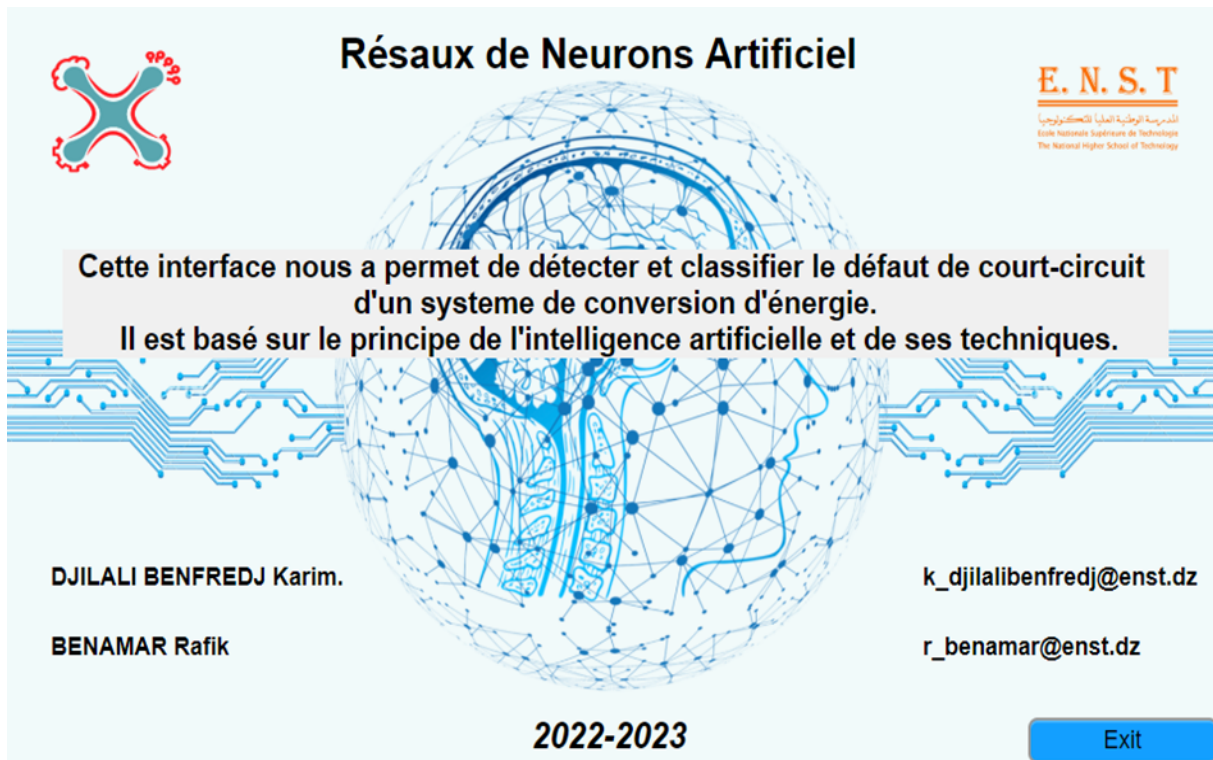


FIGURE A.14 – : : contact de l'éditeur de l'interface graphique.