



المدرسة الوطنية العليا للفنون والمهن، دارالفنون  
جامعة محمد الخامس بالرباط | ٢٠٢٤ | ٣٧٥٨٦ | ٣٧٥٩٦ | ٣٧٥٩٧ | ٣٧٥٩٨  
Université Mohammed V de Rabat  
École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Rabat

ENSAM Rabat

École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Rabat

## RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ANNÉE:

Energie Electrique et Industrie Numérique (EEIN)

Thème :

---

# Détection et Localisation de défauts dans un onduleur dans la chaîne de traction du véhicule électrique

---

Réalisé par:

KADDOURI Nassira

BOUCHMAL Ilyass

EL KAMOUSS Yahya

Devant le juré composé de:

Pr. RAYYAM (Encadrant)

Pr. Najoui

Pr. Benaata

# Table des matières

## Liste des figures

<b>1 Etat de l'art De la chaine de traction d'un véhicule électrique</b>	<b>3</b>
1.1 Chaîne de traction du véhicule électrique :	4
1.1.1 Batterie de traction :	4
1.1.2 La batterie de servitude :	5
1.1.3 Le chargeur embarqué ou OBC (On Board Charger) :	5
1.1.4 Gestion de batterie :	5
1.1.5 La Transmission (réducteur et le différentiel) :	5
1.1.6 Système de refroidissement :	6
1.1.7 Le Module Calculateur-Gestion :	6
1.2 Les convertisseurs	6
1.3 Moteurs électriques	7
1.3.1 Description du moteur BLDC	8
1.3.2 Constitution du moteur brushless	8
1.3.3 Principe de fonctionnement du moteur brushless	9
1.3.4 La commutation électrique	10
1.4 Onduleur (DC/AC)	11
1.4.1 Différents types d'onduleur	12
1.4.2 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur brushless	12
1.4.3 Structure de l'onduleur triphasé	13
1.5 Défauts potentiels et causes	13
1.5.1 Défaillance du condensateur	14
1.5.2 Défaillance des diodes classiques	14
1.5.3 Défaillance de l'interrupteur statique : l'IGBT	14
1.6 Différents types de diagnostic	17
1.6.1 Surveillance	17
1.6.2 Détection	17
1.7 Différentes méthodes de diagnostic	17
1.7.1 Approche signal	18
1.7.2 Méthodes sans modèles	19

<b>2 Modélisation du moteur brushless avec onduleur</b>	<b>20</b>
2.1 Modélisation de l'ensemble convertisseur-Moteur . . . . .	21
2.1.1 Système étudié . . . . .	21
2.2 Modèle dynamique de la machine brushless (BLDC) . . . . .	21
2.2.1 Modèle mathématique . . . . .	21
2.3 Système de commutation électrique . . . . .	24
2.3.1 Modèle mathématique d'un onduleur de tension . . . . .	24
2.3.2 Pulse Width Modulation (PWM) . . . . .	24
2.3.3 Commutation . . . . .	26
2.4 SIMULINK/MATLAB Models . . . . .	27
2.4.1 Méthode de Contrôle Proposée . . . . .	28
2.4.2 Analyse des performances d'un moteur BLDC : . . . . .	29
2.4.3 Cas de fonctionnement avec un défaut de circuit ouvert de l'onduleur . . . . .	30
2.4.4 Analyse des performances d'un moteur BLDC avec des defaut: . . . . .	31
<b>3 Analyse et Détection des Défauts dans les Onduleurs Triphasés par Apprentissage Automatique</b>	<b>32</b>
3.1 Structure du Système de Détection de Défauts . . . . .	33
3.2 Feature Extraction . . . . .	33
3.2.1 Configuration de la Simulation et Acquisition des Données . . . . .	34
3.2.2 Extraction des Valeurs Moyennes des Courants . . . . .	34
3.2.3 Calcul des Angles pour les Points Moyens . . . . .	35
3.2.4 Fault Table Based on Extracted Features . . . . .	35
3.3 Limitations des Ensembles de Données Restreints pour la Détection des Défauts en Machine Learning . . . . .	36
3.3.1 Méthodes Utilisées pour Résoudre le Problème de l'Ensemble de Données d'Entraînement Limité . . . . .	37
3.3.2 Combinaison de Méthodes d'Augmentation des Données . . . . .	39
3.4 Réseaux de neurones artificiels . . . . .	39
3.4.1 Définition . . . . .	39
3.4.2 Le neurone biologique . . . . .	39
3.4.3 Neurone formel . . . . .	40
3.4.4 Fonction d'activation . . . . .	41
3.5 Architecture des réseaux de neurones . . . . .	42
3.5.1 Avantages des techniques intelligentes . . . . .	43
3.6 Utilisation de réseaux de neurones pour la détection de défauts de circuit ouvert des IGBTs	43
3.6.1 Étude de réseau de neurone utilisé . . . . .	43
3.6.2 Construction du réseau de neurones . . . . .	43
3.7 Apprentissage de réseaux de neurones . . . . .	45
3.7.1 Résultats et interprétations . . . . .	46
3.7.2 Tests de RN utilisé . . . . .	46

3.7.3 Optimisation des Résultats avec un Décodeur Personnalisé pour la Gestion des Interruuteurs Défectueux . . . . .	47
3.7.4 Tests de RN utilisé avec décodeur et interface graphique . . . . .	48

# Liste des figures

1.1	Chaîne de Traction d'un Véhicule Électrique . . . . .	4
1.2	Batterie de Traction Haute-Tension . . . . .	4
1.3	Système de Gestion de Batterie (BMS) . . . . .	5
1.4	Réducteur et Différentiel . . . . .	6
1.5	Système de Refroidissement . . . . .	6
1.6	Classification des moteurs électriques . . . . .	8
1.7	Constitution du moteur brushless . . . . .	8
1.8	Principe de Fonctionnement du Moteur Électrique : (a) Structure Monophasé (b) Structure Triphasé . . . . .	10
1.9	Commutation et Contrôle de Vitesse . . . . .	10
1.10	Commutation en bloc . . . . .	10
1.11	Commutation sans capteur . . . . .	11
1.12	Commutation sinusoïdale . . . . .	11
1.13	Conversion du Courant Continu en Courant Alternatif . . . . .	12
1.14	Gestion des Transistors et Diodes dans l'Onduleur . . . . .	13
1.15	Défauts de Court-Circuit d'un seul interrupteur . . . . .	15
1.16	Défauts de Circuit ouvert d'un seul interrupteur . . . . .	15
1.17	Double Faute de court-circuit dans l'Onduleur . . . . .	16
1.18	Double Faute de circuit ouvert dans l'Onduleur . . . . .	17
2.1	Schéma du système d'onduleur triphasé avec charge moteur brushless (BLDC) . . . . .	21
2.2	Circuit équivalent d'un moteur triphasé en connexion étoile . . . . .	21
2.3	Signaux de force contre-électromotrice (FCEM) avec déphasage de 120 degrés . . . . .	23
2.4	Onduleur triphasé . . . . .	24
2.5	Principe de la modulation de largeur d'impulsion . . . . .	25
2.6	Réalisation de la modulation de largeur d'impulsion par modulation triangulaire porteuse et un comparateur. . . . .	26
2.7	Signaux de force contre-électromotrice (FCEM) et de capteurs à effet Hall . . . . .	26
2.8	Entraînement électrique complet d'un moteur BLDC. . . . .	27
2.9	Diagramme fonctionnel décrivant le système . . . . .	28
2.10	Régulateur de vitesse PI . . . . .	28
2.11	Formes d'ondes des courants de phase d'un moteur BLDC . . . . .	29

2.12 Caractéristiques de vitesse/temps en boucle fermée . . . . .	30
2.13 Formes d'onde de la contre-électromotrice . . . . .	30
2.14 Modèle de simulation de l'onduleur en présence de défaut (circuit ouvert) . . . . .	31
2.15 Les courant Iabc en présence de défaut dans les interrupteurs T1T2 . . . . .	31
 3.1 Diagramme en blocs du système proposé. . . . .	33
3.2 Onduleur triphasé basé sur Simulink avec signaux de création de défauts . . . . .	34
3.3 Mesure d'angle dans un espace bidimensionnel . . . . .	35
3.4 Limitations des Ensembles de Données . . . . .	36
3.5 méthodes d'augmentation des données . . . . .	37
3.6 Noise augmentation méthode . . . . .	38
3.7 Méthode d'interpolation . . . . .	39
3.8 Schéma d'un neurone biologique . . . . .	40
3.9 Schéma d'un neurone formel . . . . .	40
3.10 Un réseau de neurone non bouclé . . . . .	42
3.11 Un RNA bouclé (a connexions récurrentes) . . . . .	42
3.12 Construction des blocs RNA . . . . .	43
3.13 Structure du réseau de neurones utilisé . . . . .	44
3.14 Enter Caption . . . . .	44
3.15 : Système de simulation de diagnostic des défauts de l'onduleur par le réseau de neurone .	46
3.16 Evaluation de l'erreur quadratique en fonction du nombre d'itérations . . . . .	46
3.17 Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas normal défaut double :(a) cas normal et(b)défaut T1T2 . . . . .	47
3.18 Décodeur avec interface graphique . . . . .	48
3.19 Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas normal défaut double avec décodeur et interface graphique :(a) cas normal et(b)défaut T1T2 . . . . .	48

# Introduction générale

Le secteur de la mobilité électrique est en constante évolution, stimulé par des impératifs environnementaux et des avancées technologiques. Dans ce contexte, les véhicules électriques (VE) ont émergé comme une alternative prometteuse aux véhicules à moteur thermique, offrant une solution plus propre et plus efficiente.

Les développements des composants de l'électronique de puissance ont permis de leur rôle l'utilisation des associations convertisseur - machine électrique pour la traction des véhicules et de ce fait un gain de performances important. Cet accroissement des performances ne peut se faire au détriment de la sécurité et de la fiabilité.

Pour assurer la fiabilité et la performance des véhicules électriques, il est essentiel de surveiller attentivement chaque composant critique. Une étude des défauts du convertisseur statique (Onduleur) et de l'association convertisseur - machine électrique s'avère donc indispensable afin d'anticiper ou de maîtriser les conséquences des éventuelles défaillances.

Dans ce rapport on se focalisera sur la machine brushless comme moteur électrique dans la chaîne de traction du véhicule électrique vu qu'elle représente un compromis entre la machine à courant continu et la machine asynchrone. Et on assurera le diagnostic de l'onduleur avec un modèle de réseau de neurone, vu la stabilité et la rentabilité de cette solution. C'est dans ce contexte que ce rapport se propose de développer et d'évaluer un système automatique de diagnostic et de localisation des défauts dans un onduleur triphasé, en utilisant des techniques avancées de réseaux de neurones.

Le présent rapport se concentre sur le diagnostic des défauts de l'onduleur dans la chaîne de traction des véhicules électriques. Cela, en mettant l'accent sur les points suivants :

- Chapitre 1 : **Etat de l'art De la chaine de traction d'un véhicule électrique**, mettant en lumière les différentes architectures de moteurs brushless et les types de défauts courants dans les onduleurs triphasés.
- Chapitre 2 : **Modélisation du moteur brushless avec onduleur**, il aborde la modélisation et la simulation de l'onduleur et des moteurs associés pour mieux comprendre leur comportement en présence de défauts.
- Chapitre 3 : **Diagnostic des défauts d'un onduleur triphasé avec l'apprentissage automatique**, Un réseau de neurones est entraîné, permettant une détection des anomalies.

# Remerciement

C'est une habitude saine de remercier au début d'un tel travail tous ceux qui ont contribué à le rendre possible.

C'est avec otren enthousiasme le plus vif et le plus sincère qu'on voudrait rendre mérrite a tous ceux qui, plus ou moins à leur manière, nous ont aidés à élaborer ce rapport.

Première personne que nous tenons à remercier particulièrement est notre encadrant **Pr. RAYYAM Marwan** pour l'orientation, la confiance, et sa participation au cheminement de ce rapport qui ont constitué un apport considérable sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury **M. RAYYAM, M. NAJOUUI** et **M. BENAATA** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre sujet en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et respects à toute l'équipe pédagogique de l'école nationale supérieure d'arts et métiers Rabat et les intervenants professionnels responsables de la formation, pour avoir assuré la partie théorique et qui par leurs compétences nous ont soutenu.

# Chapter 1: Etat de l'art De la chaine de traction d'un véhicule électrique

## Introduction:

Dans ce chapitre, nous examinons en détail la chaîne de traction et ses différentes compositions, ainsi que les défauts potentiels de l'onduleur et des suggestions pour les détecter et les localiser efficacement

### 1.1 Chaîne de traction du véhicule électrique :

La chaîne de traction d'un véhicule électrique (VE) désigne le dispositif responsable de la transformation de l'énergie électrique stockée dans la batterie en mouvement mécanique qui propulse le véhicule. En d'autres termes, c'est le système qui assure la conversion de l'énergie électrique en mouvement pour le fonctionnement du véhicule.

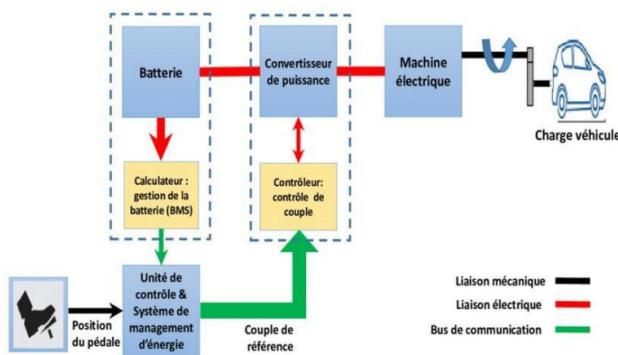


Figure 1.1: Chaîne de Traction d'un Véhicule Électrique

#### 1.1.1 Batterie de traction :

La batterie de traction, ou la batterie haute-tension (HT), constitue un dispositif de stockage d'énergie électrique. Sa fonction principale est de fournir de l'énergie aux moteurs électriques selon la demande "les consignes" du conducteur. Actuellement, la majorité des véhicules électriques sont équipés des batteries au lithium-ion. La plupart des batteries de traction fournissent un courant continu (DC) de 400 V, des avancées récentes ont permis l'installation de batteries atteignant jusqu'à 800 V sur certains modèles (tels que Porsche, Audi, Hyundai, Kia)[1].



Figure 1.2: Batterie de Traction Haute-Tension

### 1.1.2 La batterie de servitude :

C'est une batterie de 12 V chargée d'alimenter le réseau de bord et tous les consommateurs électriques habituels (relais de contact, radio, signalisation, feux, essuie-glaces, climatisation, lève-vitres...). Elle est rechargée automatiquement par la batterie de traction via un convertisseur DC/DC.

### 1.1.3 Le chargeur embarqué ou OBC (On Board Charger) :

Lorsque le V.E est connecté à une source externe d'alimentation en courant alternatif (AC), l'OBC est chargé de redresser le courant alternatif pour alimenter la batterie de traction en courant continu (DC). On parle alors de convertisseur AC/DC. C'est en général lui qui limite la rapidité de chargement.

### 1.1.4 Gestion de batterie :

Le système de gestion de batterie (BMS) optimise les performances et la durée de vie de la batterie en surveillant et en contrôlant divers paramètres de la batterie, tels que la température, la tension et le courant. Le BMS est donc l'organe électronique qui sécurise le véhicule électrique et la batterie contre le vieillissement prématûr, et l'incendie lors d'usages inadéquats[2].



Figure 1.3: Système de Gestion de Batterie (BMS)

### 1.1.5 La Transmission (réducteur et le différentiel) :

Le réducteur est chargé de réduire la vitesse de rotation du moteur électrique pour entraîner les roues à une vitesse compatible avec la conduite du véhicule. et pour réguler la distribution du couple du moteur aux roues. On parle alors de rapport de réduction X, c'est-à-dire que les roues tournent X fois moins vite que le moteur électrique. Comme sur une voiture classique on trouve ensuite un différentiel qui permet d'entraîner les roues à des vitesses différentes selon les besoins.



Figure 1.4: Réducteur et Différentiel

#### 1.1.6 Système de refroidissement :

Les composants de la chaîne de traction risquent de générer de la chaleur pendant leur fonctionnement. Un système de refroidissement maintient des températures optimales pour garantir l'efficacité et prolonger la durée de vie des composants[3].

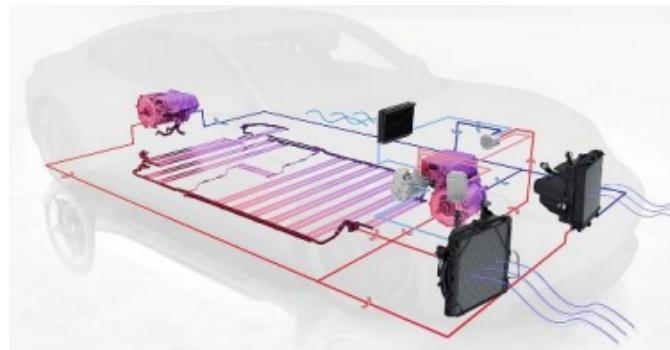


Figure 1.5: Système de Refroidissement

#### 1.1.7 Le Module Calculateur-Gestion :

Le module Calculateur-Gestion contrôle les flux d'énergie par l'intermédiaire de nombreux capteurs. À l'accélération, il gère le flux d'énergie à envoyer vers le moteur. Le courant continu délivré par la batterie de traction est alors "haché" par un onduleur pour alimenter le moteur en courant alternatif. Le module gère également le flux d'énergie issu du moteur lors des phases de décélération ou de freinage. Le courant alternatif est alors redressé pour recharger la batterie HT en courant continu.

## 1.2 Les convertisseurs

L'utilisation d'une chaîne de traction électrique dans un véhicule sous-entend la présence à leur bord d'une source d'énergie électrique qui est une batterie de capacité appropriée à l'autonomie souhaitée du véhicule. Dans la plupart des véhicules électriques, on se trouve confronté à la compatibilité des sources

d'énergie à courant continu et à courant alternatif et à l'intérieur de même catégorie à des compatibilités entre les tensions des sources et des récepteurs. Ce problème de compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules électriques des convertisseurs électriques dont le rôle est de lever les incompatibilités de fonctionnement[4].

- **Convertisseur alternatif/continu (redresseur)** Dans un VE, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution général, soit par un alternateur placé à bord du VE et accouplé à un moteur thermique, en énergie électrique à courant continu, qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques et/ou dans une batterie de grande capacité.
- **Convertisseur DC/DC** Il a pour rôle de convertir la tension du courant continu H.T, issu de la batterie de traction, en un courant continu 12 V pour recharger la batterie de servitude et alimenter les différents équipements du V.E.
- **Onduleur (DC/AC)** L'onduleur (ou convertisseur de puissance) transforme le courant continu de la batterie en courant alternatif pour alimenter le moteur électrique.

### 1.3 Moteurs électriques

Aujourd'hui, les applications qui reposent sur l' entraînement par moteur électrique sont multiples et variées, nécessitant des performances spécifiques qui rendent le choix du moteur approprié particulièrement délicat. Ces moteurs se différencient les uns des autres par leur efficacité, leur coût, leur réponse en vitesse, leur facilité de fabrication et de contrôle, entre autres critères. De plus, dans le contexte de la motorisation électrique des véhicules, les moteurs remplissent deux fonctions principales : ils peuvent agir en tant que moteur pour propulser le véhicule ou en tant que génératrice pour récupérer l'énergie mécanique, que ce soit lors du freinage ou grâce à l'énergie fournie par un moteur thermique, afin de recharger la batterie. Cette diversité de fonctions entraîne une variété de types de moteurs disponibles sur le marché, qui peuvent également être classifiés en fonction de leur utilisation d'aimants permanents (PM) ou non. On trouve alors de nombreux types sur le marché. La figure 1 montre une classification des machines électriques. Le premier niveau distingue la machine à courant continu et les machines alternatives. Le moteur universel est un cas particulier de moteur fonctionnant aussi bien sur courant continu que sur courant alternatif.

Parmi les machines alternatives, le second niveau distingue les machines synchrones et asynchrones. Parmi les machines synchrones, la machine synchrone auto-piloté correspond au moteur brushless à commande sinusoïdale (BLAC, Brushless Alternative Current), tandis que le moteur BLDC (BrushLess Direct Current) correspond à un moteur brushless à commande en créneau[5].

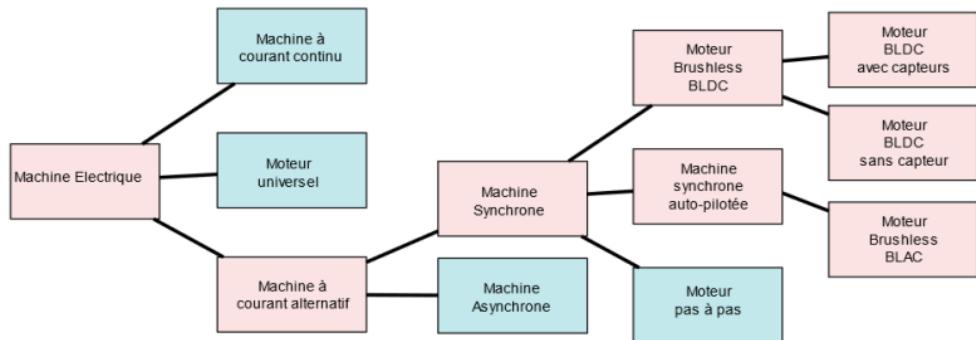


Figure 1.6: Classification des moteurs électriques

### 1.3.1 Description du moteur BLDC

Le moteur de type Brushless se comporte comme un moteur à courant continu traditionnel. Il présente des caractéristiques semblables à celles des moteurs courant continu et alternatif sans les inconvénients : une forte dynamique de vitesse et d'accélération sans l'usure mécanique des moteurs courant continu. Le moteur BLDC est une machine composée d'un stator bobiné et d'un rotor à aimants permanents. Contrairement aux moteurs avec balais, où les enroulements du rotor sont alimentés par des balais, la commutation du moteur BLDC est réalisée électroniquement. Dans le cas du BLCD, la commutation peut être commandée à partir d'une mesure par capteurs à effet Hall à 6 points par tour, ou encore à partir d'une mesure de force contre-électromotrice (moteurs dits sans capteurs : « sensorless »).

### 1.3.2 Constitution du moteur brushless

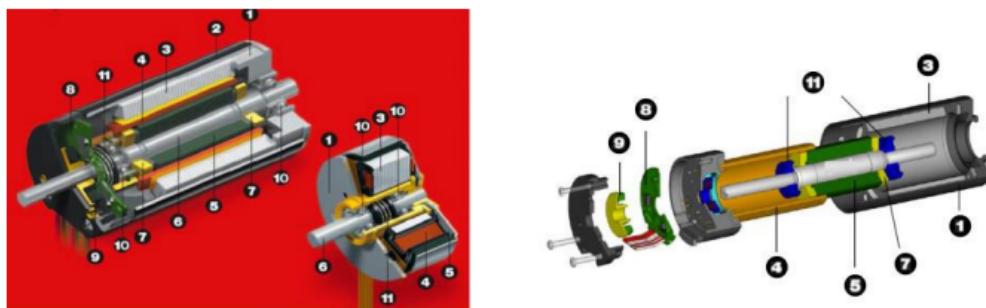


Figure 1.7: Constitution du moteur brushless

- 1. Flasque
- 2. Carcasse
- 3. Toles statoriques
- 4. Bobinage
- 5. Aimant Permanent (rotor)

- 6. Arbre
- 7. Disques d'équilibrage
- 8. Capteur à effet hall
- 9. Aimants de commande
- 10. Roulements préchargés
- 11. Précontrainte

Le moteur brushless est composé de :

- **Stator** : C'est un empilement de tôles statoriques qui évitent l'établissement d'un courant de Foucault dans le corps du moteur. Elles sont associées au bobinage du moteur triphasé connecté en étoile ou en triangle.
- **Rotor** : Le rotor est constitué de l'axe moteur, de l'aimant à 1 ou plusieurs paires de pôles et de disques d'équilibrages. Les aimants du rotor du moteur à commutation électronique EC sont en ferrite, en samarium cobalt (SmCo5, Sm2Co17) et Neodyme ferboire NdFeB. Le rotor peut être soit à aimants déposés, soit à concentration de flux ; cette seconde conception étant réalisée avec un volume d'aimants plus faible.
- **Les paliers** : Ils sont le seul lien mécanique entre le stator et le rotor. La durée de vie de l'ensemble en dépend. Ces roulements à billes pré chargées permettent d'obtenir une longue durée de vie. Cette durée de vie est également proportionnelle à la vitesse maximale, au déséquilibre résiduel et à la charge appliquée aux paliers créés pour fonctionner des dizaines de milliers d'heures. Les moteurs brushless sont des moteurs courant continu de haute qualité. Le rotor est fixe et l'aimant permanent tourne dans le champ généré par le bobinage triphasé.
- **Capteurs à effet hall** : Ils permettent à l'électronique d'assurer la commutation des phases du moteur. Le recopage de la position du rotor peut se faire soit par l'intermédiaire de 3 capteurs magnétiques placés dans le moteur, soit grâce à un résolveur embarqué sur le moteur. La 1ere solution est une solution économique et convenable pour une régulation simple. La seconde permet de parvenir à une régulation exacte, particulièrement pour le positionnement.
- **Carte électronique** : Elle est utilisée pour piloter le moteur brushless. C'est elle qui définit la direction et la force du champ en fonction de l'information donnée par le capteur effet hall.

### 1.3.3 Principe de fonctionnement du moteur brushless

En appliquant le courant approprié dans les enroulements du stator, un champ magnétique est généré et attire les aimants permanents du rotor. La rotation du moteur est ensuite obtenue en modifiant la direction du champ magnétique obtenue en alimentant la phase de stator appropriée. Ceci est effectué par un système d'asservissement électronique comme ceux présentés dans les figures 1.8.

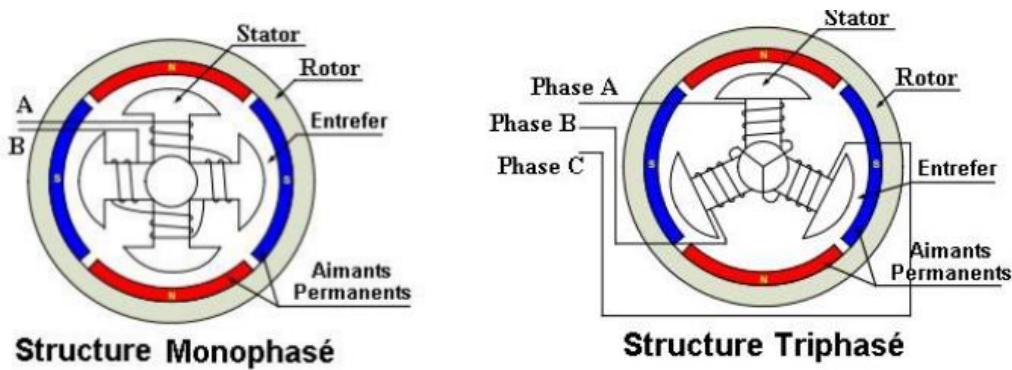


Figure 1.8: Principe de Fonctionnement du Moteur Électrique : (a) Structure Monophasé (b) Structure Triphasé

### 1.3.4 La commutation électrique

La commutation du courant d'une phase à une autre, assurée via des interrupteurs, est accomplie à partir de la position du rotor par rapport au stator, tandis que pour contrôler la vitesse de rotation, la magnitude du courant fournie dans les bobines du stator est ajustée.

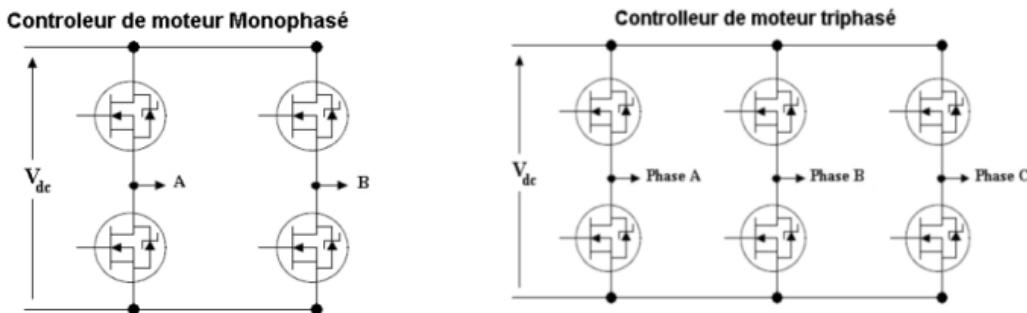


Figure 1.9: Commutation et Contrôle de Vitesse

#### La commutation en bloc avec capteurs effet hall

3 capteurs à effet hall fixes au rotor montrent la position de l'aimant par rapport au bobinage. Ils donnent 6 options de coupure différentes par séquence de commutation. Les 3 phases sont traversées par le courant durant 6 phases distinctes en fonction des informations fournies par les capteurs.

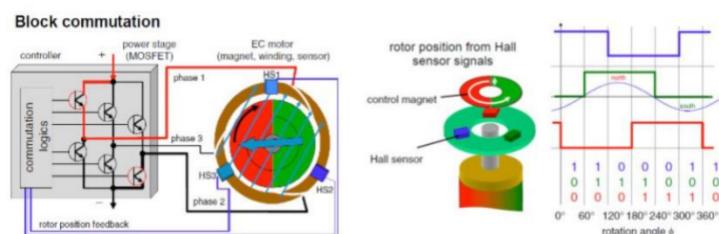


Figure 1.10: Commutation en bloc

## La commutation sans capteur

Le moteur démarre avec une séquence de commutation prédéfinie selon une rampe d'accélération. Ensuite, la tension induite définit la position du rotor. Son passage à 0 est reconnu par l'électronique qui commute le courant du moteur. L'amplitude de cette tension est fonction de la vitesse. Cette valeur est trop faible pour que le passage à 0 ne peut être reconnu pour des vitesses faibles ou l'arrêt.

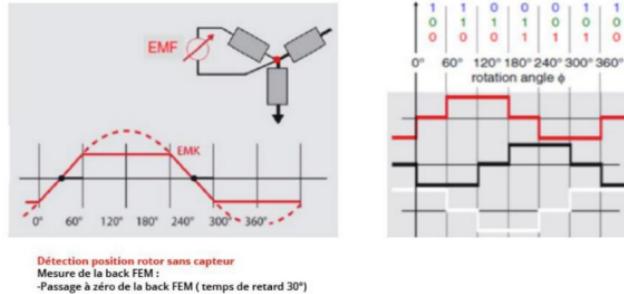


Figure 1.11: Commutation sans capteur

## La commutation sinusoïdale ou vectorielle de flux

La commutation sinusoïdale est permise avec un codeur à résolution suffisante : 500 pts/tour/paire de pôles. Elle augmente la constante couple et entraîne ainsi des mouvements de régulation plus doux.

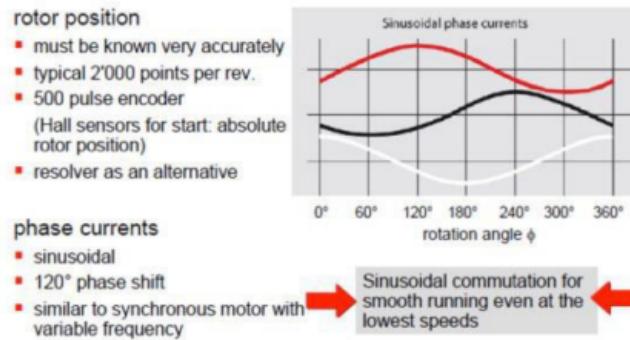


Figure 1.12: Commutation sinusoïdale

## 1.4 Onduleur (DC/AC)

L'onduleur est utilisé pour transformer l'énergie électrique à courant continu (côté batterie) en énergie électrique à courant alternatif (côté stator de la machine). Il permet de réaliser la commande du couple de la machine et donc le réglage de la vitesse du véhicule.



Figure 1.13: Conversion du Courant Continu en Courant Alternatif

#### 1.4.1 Différents types d'onduleur

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

##### Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour des moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

##### Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes.

- **Onduleur de courant** L'onduleur de courant transforme un courant continu en courants triphasés dans les enroulements de la machine. Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de sortie, l'amplitude de celle-ci doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée.
- **Onduleur de la tension** Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable, la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-conducteurs contrôlables, puissants, robustes, et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion.

#### 1.4.2 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur brushless

La vitesse d'un moteur BLDC est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée.

### 1.4.3 Structure de l'onduleur triphasé

L'onduleur est composé de six transistors avec une diode anti-parallèle pour chacun. Les transistors  $T_a$  et  $T'a$  comme  $T_b$  et  $T'b$  et  $T_c$  et  $T'c$  sont complémentaires en théorie c'est-à-dire que lorsque l'un deux sont ouvert l'autre est fermé et inversement. Dans la théorie seulement car les commutations réelles des interrupteurs de puissance ne sont pas instantanées. La configuration la plus dangereuse est celle où les deux transistors sont fermés, car la tension de bus (de l'ordre de plusieurs centaines de volts) est mise en court-circuit. Un courant très important se déverse alors dans les transistors entraînant leur destruction. C'est donc cette configuration que l'on va éviter. On ouvrira donc l'un des transistors avant de fermer l'autre. Le temps de sécurité entre l'ouverture de l'un et la fermeture de l'autre est appelé « temps mort ». Il doit être parfaitement calibré pour un fonctionnement optimal de l'onduleur. Le moteur étant un circuit inductif qui n'apprécie pas les discontinuités de courants, c'est pour cela que chaque transistor possède une diode en antiparallèle. Pour laisser passer le courant pendant les phases où les deux transistors sont ouverts.

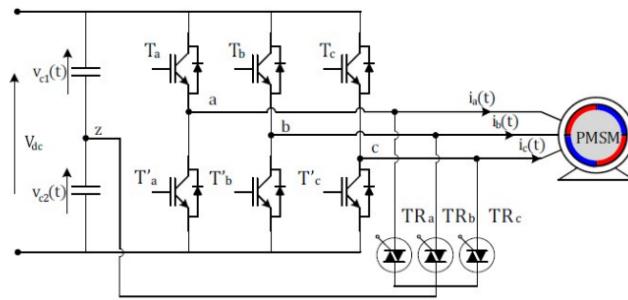


Figure 1.14: Gestion des Transistors et Diodes dans l'Onduleur

## 1.5 Défauts potentiels et causes

L'onduleur de tension alimentant MI a trouvé la plus grande application dans le domaine des variateurs de vitesse. Toutefois, comme cela est courant avec la plupart des variateurs de vitesse des machines électriques, la fiabilité de ce type de système souffre surtout de la défaillance des dispositifs semi-conducteurs de l'onduleur[6]. Dans la plupart des cas, la défaillance se traduirait par l'arrêt du système d'entraînement. Les défauts de l'onduleur peuvent être classés en deux catégories principales :

- **Défaut d'alimentation :** Cela englobe les problèmes liés au réseau électrique connecté au convertisseur, tels que la surtension, la sous-tension, le déséquilibre triphasé, les mauvais contacts ou les dommages à l'interrupteur principal et les défauts causés par le fusible.
- **Défaillances internes :** Ces défauts se produisent à l'intérieur du convertisseur lui-même, comme les courts-circuits, les surtensions ou les sous-tensions dans le circuit intermédiaire, ainsi que des problèmes dans les liaisons de l'onduleur, comme des surtensions de sortie, des sous-tensions, des déséquilibres et des surintensités.

Les causes de ces défauts peuvent être divisées en deux catégories :

- **Causes externes :** Ces facteurs proviennent de l'environnement externe du convertisseur, tels qu'une mauvaise utilisation, des paramètres incorrects, des charges excessives, des dommages au ventilateur de refroidissement, une température élevée, des interférences externes ou des problèmes avec le réseau électrique lui-même.
- **Causes internes :** Ces facteurs sont liés au convertisseur lui-même, comme les courts-circuits, les éléments de mise à la terre endommagée, les problèmes d'isolation, les mauvais contacts des connecteurs ou les dommages aux modules.

### 1.5.1 Défaillance du condensateur

Le défaut de condensateur de bus continu est provoqué soit par la mise en court-circuit de celui-ci, c'est alors la source même qui est mise en court-circuit soit par la mise du condensateur en circuit ouvert, alors le système perd le filtrage de la tension. L'onduleur verra alors les surtensions et les creux de tension jusqu'alors retenus par le condensateur.

### 1.5.2 Défaillance des diodes classiques

Pour les diodes classiques, l'analyse est plus complexe car il existe plusieurs modes de défaillance possibles. Toutefois, seul le vieillissement, qui est la défaillance la plus importante, sera présenté ici [3] Les diodes peuvent vieillir de plusieurs façons. Il peut y avoir un problème sur la puce de silicium, un problème sur le boîtier qui n'est plus ou pas hermétique. Un indicateur de l'état de la diode est l'impédance thermique  $Z_a$  qui devra être le plus petit possible. Elle est définie par la relation suivante : Où :P puissance dissipée dans

$$Z_{th} = \frac{T_{jonction}^0 - T_{boitier}^0}{P}$$

la diode en Watt ; Les coefficients de dilatation des différents matériaux de la diode étant différents, des craquelures peuvent apparaître. La dissipation thermique est alors de moins en moins bonne et l'impédance thermique va augmenter (se dégrader). La défaillance apparaît ainsi en fin de vie du composant, pendant la période dite "d'usure". Ce problème se retrouve dans la plupart des semi-conducteurs de puissance.

### 1.5.3 Défaillance de l'interrupteur statique : l'IGBT

- **Court-circuit** Un court-circuit se produit lorsque l'un des composants d'une cellule de commutation reste constamment fermé, souvent à cause d'une surchauffe critique de la puce de silicium (IGBT ou diode) ou d'une défaillance du circuit de commande. Ce problème altère significativement les courants de phase, ce qui peut gravement endommager le convertisseur. Pour prévenir de tels incidents, des systèmes de protection doivent être mis en place pour isoler immédiatement le bras affecté dès la détection de la défaillance[7].

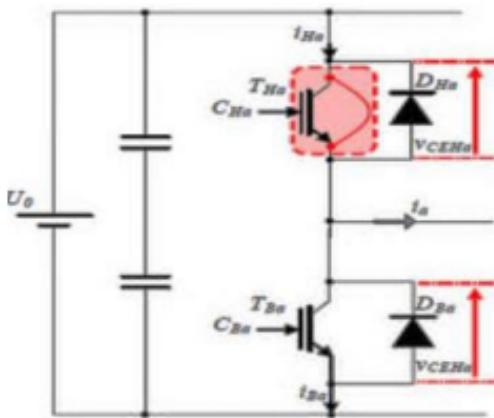


Figure 1.15: Défauts de Court-Circuit d'un seul interrupteur

- **Circuit ouvert** Il se peut, pour diverses raisons, qu'un des composants d'électroniques de puissance (diode, thyristor, etc.) d'une cellule de commutation d'un bras reste constamment ouvert (défaut de type circuit ouvert). Ce type de défaut a pour principale cause le vieillissement du composant, ou une défaillance de la commande rapprochée (défaut thermique du driver, ou perte d'alimentation par exemple). Ce type conduit à la perte de la symétrie de la tension et/ou courant alternatif ainsi que l'augmentation du taux d'ondulation de la tension et/ou courants continus. Cela peut être interprété sur le plan mécanique de la machine par l'apparition de vibrations et un échauffement au cours du temps. Les différents types de défauts de l'onduleur ont pour conséquence soit un défaut "circuit ouvert" soit un défaut de "court-circuit".

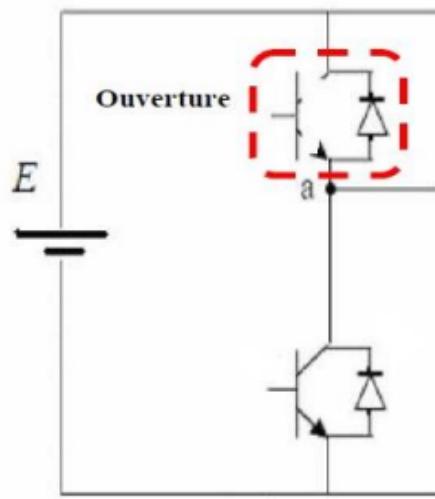


Figure 1.16: Défauts de Circuit ouvert d'un seul interrupteur

- **Court-circuit de deux interrupteurs** : Ce cas est spécifique par rapport aux précédents cas cités. En effet, pour que ce cas apparaisse, il faut que l'onduleur soit victime d'une double faute. Il faut différencier deux cas pour ces doubles fautes. Le premier concerne deux court-circuits sur deux bras différents. Pour une machine pilotée sur trois phases avec un onduleur à trois bras, cela signifie l'arrêt inévitable du moteur qui ne peut plus être alimenté. Si de plus les court-circuits concernent

un interrupteur connecté au positif du bus continu et l'autre connecté au négatif, un courant continu de défaut est créé passant par les deux phases concernées et pouvant aller jusqu'à la détérioration du moteur, la résistance des bobines étant faible. Le second cas est plus grave car il concerne les court-circuits de deux interrupteurs sur un même bras. La source se trouve alors en court-circuit, ce qui pourrait, en plus de neutraliser la machine électrique, détériorer une autre partie du système. Pour cette faute, et de manière générale pour toute faute entraînant un court-circuit de la source, un système de déconnexion de l'alimentation doit être prévu pour isoler au moins la partie défectueuse. Cette double faute peut donc être critique, causant l'impossibilité d'utiliser un moteur classique, et une problématique importante pour la tolérance d'une telle double faute.

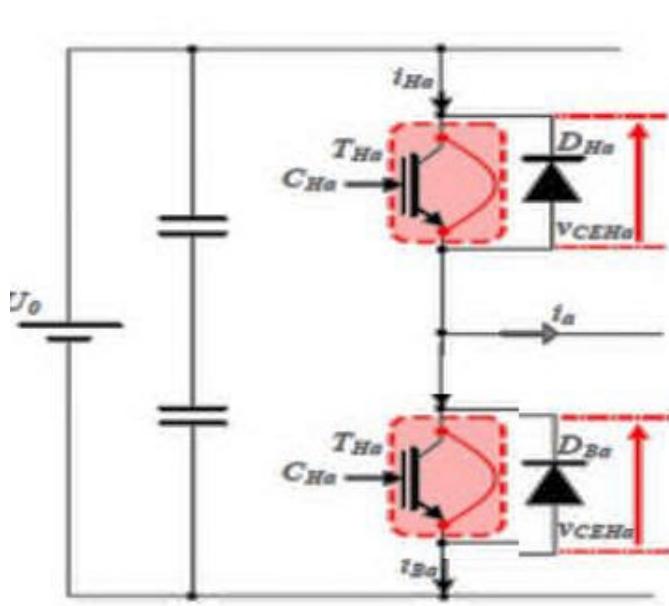


Figure 1.17: Double Faute de court-circuit dans l'Onduleur

- **Circuit ouvert de deux interrupteurs :** Ce mode de défaut correspond à la perte de la commande d'un bras, ses deux interrupteurs restants ouverts. La phase n'est plus connectée qu'à travers les diodes antiparallèles de la cellule de commutation, la conduction spontanée d'une des diodes du bras en défaut dépend des forces électromotrices développées par la machine et des commandes des bras restants. Le courant dans la phase concernée est assez faible, voire quasiment nul, selon la commande effectuée et les courants dans les phases saines ont leurs fondamentaux en opposition de phase. Si la défaillance survient à haute vitesse, la durée de conduction des diodes se trouve augmentée. Comme les diodes restituent de l'énergie vers le bus continu, la valeur moyenne du couple produit s'en trouve réduite.

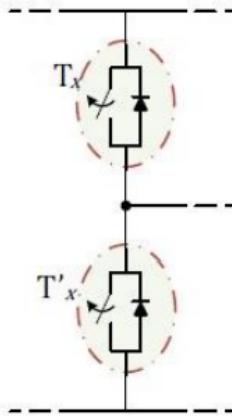


Figure 1.18: Double Faute de circuit ouvert dans l'Onduleur

## 1.6 Différents types de diagnostic

Ces dernières années, la maintenance prédictive s'est largement adoptée dans l'industrie automobile, car les chercheurs ont rapidement compris son potentiel pour réduire les pannes, éviter les interruptions imprévues et anticiper les arrêts de production. Concrètement, ce type de maintenance améliore la fiabilité en surveillant de manière précise les performances des machines. Pour cela, il est essentiel de recourir à des méthodes et techniques qui rendent cette approche efficace et répondent aux exigences de l'industrie.

### 1.6.1 Surveillance

C'est un processus informationnel passif qui analyse l'état du système et fournit des indications. La surveillance implique la détection et la classification des défaillances en évaluant le système, suivie du diagnostic qui localise les éléments défaillants et identifie leurs causes initiales.

### 1.6.2 Détection

Pour détecter les défaillances du système, il est nécessaire de pouvoir classifier les situations observables comme étant normales ou anormales. Le diagnostic désigne l'identification des causes potentielles de la défaillance à partir d'un raisonnement logique basé sur un ensemble d'informations issues d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Ce processus implique deux tâches principales :

- Observer les symptômes de la défaillance ;
- Identifier la cause de la défaillance à travers un raisonnement logique

## 1.7 Différentes méthodes de diagnostic

Il existe plusieurs méthodes pour le diagnostic des défauts et la protection des transistors bipolaires, en particulier ceux utilisés dans les C/S. Vingt et une méthodes sont dédiées aux défauts de circuit ouvert

et dix aux courts-circuits. En se basant sur leurs performances et les efforts de mise en œuvre, parmi ces méthodes, on peut citer.

### 1.7.1 Approche signal

Pour diagnostiquer une défaillance ou une dégradation, on utilise généralement des signatures qui regroupent les informations considérées pertinentes par les spécialistes des matériaux. La complexité de ces signatures dépend de la nature des systèmes et des matériaux à diagnostiquer, et varie selon l'anomalie recherchée. Cette méthode nécessite l'application de techniques de traitement du signal.

#### Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux

L'analyse spectrale est une technique établie depuis longtemps pour détecter les défaillances dans les machines électriques, notamment les ruptures de barres rotoriques des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages, ainsi que les circuit-ouverts des IGBT dans les convertisseurs statiques. Ces situations sont bien adaptées à cette méthode car de nombreux phénomènes produisent des fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation. La surveillance par analyse spectrale des entraînements électriques implique l'application d'une transformée de Fourier aux grandeurs affectées par le défaut, permettant de visualiser les fréquences parasites qui constituent la signature d'une anomalie dans la machine. Les grandeurs mesurables typiques pour un système onduleur-machine asynchrone incluent :

- Courants absorbés
- Flux de dispersion
- Tension d'alimentation
- Couple électromagnétique
- Vitesse du rotor
- Vibrations
- Tension de neutre

#### Méthode d'analyse temps-fréquence et temps échelle

L'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier (TF) est efficace pour décrire les signaux stationnaires et pseudo-stationnaires, mais elle présente des limitations lorsque les signaux ne sont pas stationnaires. Dans de tels cas, les outils d'analyse temps-fréquence sont préférés. Parmi ces méthodes, on trouve :

- Transformée de Fourier sur une fenêtre glissante
- Transformée en ondelettes
- Transformée de Wigner-Ville
- Transformée d'Hilbert-Huang

### 1.7.2 Méthodes sans modèles

Cette approche suppose que la connaissance du processus se fonde principalement sur son observation passée et présente, reposant sur l'expertise humaine. L'historique de ce système constitue une base de données utilisée pour extraire des descripteurs lors de divers modes de fonctionnement du processus.

#### Les réseaux de neurones artificiels (RNA)

Les réseaux de neurones sont des modèles informatiques inspirés par le fonctionnement des neurones humains, utilisant l'intelligence artificielle pour prendre des décisions basées davantage sur la précipitation que sur le raisonnement logique formel. Cette approche est explorée dans de nombreux domaines tels que la compréhension et la synthèse du langage naturel, la classification, le diagnostic, etc. Les réseaux de neurones présentent des caractéristiques remarquables telles que la capacité d'apprentissage et d'autoorganisation, bien qu'ils soient souvent considérés comme des "boîtes noires".

Pour diagnostiquer des défauts dans un système, un réseau de neurones nécessite un ensemble adéquat d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour apprendre. La conception du réseau comprend plusieurs étapes telles que le choix du type de réseau, des neurones, du nombre de couches et des méthodes d'apprentissage. Pendant la phase d'apprentissage, les poids des connexions entre les neurones sont ajustés de manière incrémentale en présentant des exemples en entrée avec leurs diagnostics correspondants en sortie. Après l'apprentissage, le réseau peut reconnaître non seulement les exemples appris, mais aussi des modèles similaires, ce qui lui confère une certaine robustesse face aux variations de signaux dues au bruit.

#### Conclusion :

Ce chapitre se concentre sur la revue de l'état de l'art d'une étude de la chaîne de traction de véhicule électrique avec les différents types des moteurs ainsi une étude statistique des différents types de défauts d'un convertisseur statique, ainsi que sur la définition des défauts internes et externes de ce type de convertisseur. Nous commençons par introduire quelques définitions et terminologies couramment utilisées dans ce domaine. Les méthodes de diagnostic discutées dans la littérature se décomposent en trois étapes principales : la surveillance, la détection et le diagnostic.

## Chapter 2: Modélisation du moteur brushless avec onduleur

## Introduction:

La modélisation des moteurs brushless (BLDC) avec leur onduleur associé est cruciale pour la conception et le contrôle des systèmes de traction électrique. Ce chapitre vise à décrire les principes fondamentaux et les équations nécessaires pour modéliser le comportement dynamique de ces systèmes complexes lors du fonctionnement normal et défaillant.

## 2.1 Modélisation de l'ensemble convertisseur-Moteur

### 2.1.1 Système étudié

Le système étudié consiste à deux parties essentielles :



Figure 2.1: Schéma du système d'onduleur triphasé avec charge moteur brushless (BLDC)

- **Partie 1 :** onduleur triphasé à base de la diode et d'IGBT, commandé par la technique (MLI-sinus triangle).
- **Partie 2 :** Charge Moteur brushless (BLDC).

## 2.2 Modèle dynamique de la machine brushless (BLDC)

### 2.2.1 Modèle mathématique

Dans ce rapport, un moteur BLDC triphasé en connexion étoile est proposé. En supposant que  $R_a = R_b = R_c = R$  en raison de la symétrie du moteur BLDC triphasé et  $L_a = L_b = L_c = L_p$ , le circuit équivalent est organisé comme indiqué sur la Figure. Ici, les lettres minuscules  $a$ ,  $b$ , et  $c$  désignent les phases du moteur BLDC [8].

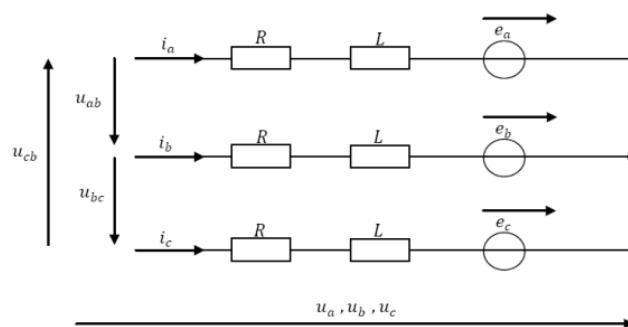


Figure 2.2: Circuit équivalent d'un moteur triphasé en connexion étoile

Le modèle de l'enroulement de l'induit pour le moteur BLDC est exprimé comme suit :

$$u_a = R i_a + L \frac{d i_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

$$u_b = R i_b + L \frac{d i_b}{dt} + e_b \quad (2)$$

$$u_c = R i_c + L \frac{d i_c}{dt} + e_c \quad (3)$$

Ainsi

$$u_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (4)$$

$$u_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (5)$$

$$u_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (6)$$

Où

- $R$  est la résistance statorique par phase [Ohm].
- $L$  est l'inductance statorique par phase [Henry].
- $e_a, e_b, e_c$  sont les contre MFs du moteur [Volt].
- $i_a, i_b, i_c$  sont les courants de phase du stator [Ampère].
- $u_a, u_b, u_c$  sont les tensions de phase du stator [Volt].
- $u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}$  sont les tensions entre deux phases [Volt].

La relation entre les courants de phase est donnée par l'équation suivante:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (7)$$

Étant donné que chaque tension est une combinaison linéaire des deux autres tensions, deux équations sont suffisantes. En négligeant une équation et en éliminant une variable à l'aide de l'Équation (7), l'Équation (4) et l'Équation (5) peuvent être écrites comme suit :

Étant donné que chaque tension est une combinaison linéaire des deux autres tensions, deux équations sont suffisantes. En négligeant une équation et en éliminant une variable à l'aide de l'Équation (7), l'Équation (4) et l'Équation (5) peuvent être écrites comme suit :

$$u_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (8)$$

$$u_{bc} = R(i_a - 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - 2i_b) + e_b - e_c \quad (9)$$

D'après la deuxième loi de Newton, la relation entre le couple électromagnétique et la vitesse du moteur peut être exprimée comme suit :

$$T_e - T_l = J \frac{d \omega_m}{dt} + B \omega_m \quad (10)$$

$$\omega_m = \frac{d \theta_m}{dt} \quad (11)$$

Où :

- $T_l$  : Couple de charge en Nm
- $J$  : Moment d'inertie en kg/m<sup>2</sup>
- $B$  : Constante d'amortissement

Exprimés comme suit :

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \quad (12)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (13)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (14)$$

$$T_a = \frac{k_t}{2} i_a F(\theta_e) \quad (15)$$

$$T_b = \frac{k_t}{2} i_b F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (16)$$

$$T_c = \frac{k_t}{2} i_c F\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (17)$$

Par conséquent :

$$T_e = \frac{k_t}{2} \left[ F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (18)$$

Les constantes  $k_e$  et  $k_t$  représentent respectivement la constante de force contre-électromotrice (Back-EMF) et la constante de couple électromagnétique. L'angle électrique  $\theta_e$  est égal à l'angle mécanique  $\theta_m$  du moteur multiplié par le nombre de paires de pôles ( $\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$ ). La fonction  $F(\theta)$  dépend de la position du rotor et génère la forme d'onde trapézoïdale de la force contre-électromotrice. Une période de cette fonction peut être exprimée comme suit:

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right), & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1, & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ 1 + \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{5\pi}{3}\right), & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (19)$$

En raison de la conception symétrique du moteur, le signal de force contre-électromotrice (Back-EMF) de chaque phase est déphasé de 120 degrés par rapport aux autres phases, comme illustré à la Figure.

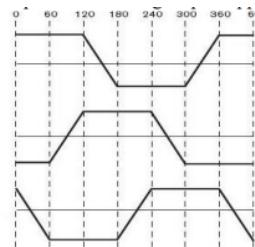


Figure 2.3: Signaux de force contre-électromotrice (FCEM) avec déphasage de 120 degrés

## 2.3 Système de commutation électrique

Dans ce projet, un onduleur à IGBT en pont complet triphasé à deux niveaux est utilisé pour assurer la fonction de commutation de puissance. Il est également intégré à d'autres circuits qui récupèrent les informations de position, les traitent, puis transmettent les signaux de commande de grille afin de commuter les transistors de l'onduleur. Ensuite, nous discuterons brièvement de chaque partie.

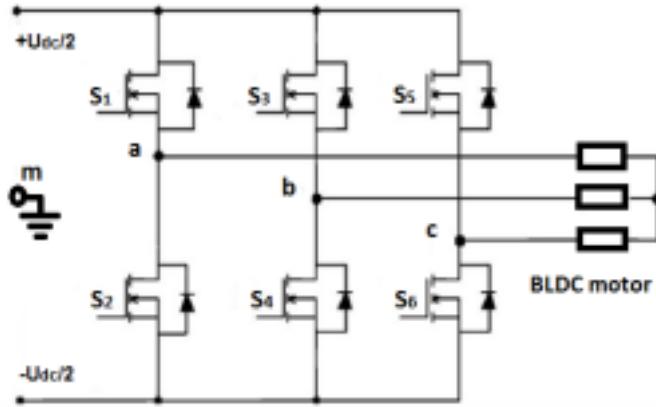


Figure 2.4: Onduleur triphasé

### 2.3.1 Modèle mathématique d'un onduleur de tension

Considérons que la tension du lien continu est divisée en deux moitiés avec le point milieu 'm'. Ensuite, la tension de chaque point milieu de jambe est représentée par  $u_{am}$ ,  $u_{bm}$  et  $u_{cm}$ . Respectivement, les tensions ligne à ligne sont dérivées des tensions de point milieu comme suit :

$$u_{ab} = u_{am} - u_{bm} \quad (20)$$

$$u_{bc} = u_{bm} - u_{cm} \quad (21)$$

$$u_{ca} = u_{cm} - u_{am} \quad (22)$$

En fonction des signaux de commutation de  $S_1$  vers  $S_2$ , le transistor respectif s'allume ou s'éteint et produit des signaux de sortie. Dans ce projet, ces signaux de commutation sont une combinaison de références modulées à partir des contrôleurs et de séquences de commutation basées sur les données des capteurs à effet Hall. Ensuite, nous discuterons brièvement de la modulation de largeur d'impulsion (PWM), puis expliquerons comment ces signaux PWM sont combinés aux séquences de commutation.

### 2.3.2 Pulse Width Modulation (PWM)

Les sorties des commandes analogiques ou numériques représentent les tensions ou les courants souhaités aux bornes de la machine asynchrone (MAS). La technique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence et tension fixes, généralement une tension continue, via un convertisseur. Ce convertisseur établit les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs ainsi que

par les séquences de fonctionnement. La commande par MLI, à partir d'une source de tension continue constante, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière à ce que le fondamental de la tension se rapproche le plus possible de la référence de tension sinusoïdale.

L'augmentation du nombre d'impulsions formant chaque alternance de la tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importants.

- Permet de déplacer les harmoniques de la tension vers des fréquences plus élevées, facilitant ainsi le filtrage.
- Permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

L'essor de la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) est étroitement lié aux progrès des semi-conducteurs de puissance. L'augmentation du nombre de commutations aurait entraîné des pertes excessives si les pertes à chaque commutation n'avaient pas été réduites avec succès. En considérant le signal des contrôleurs comme une valeur continue

$$S^* \in [-1, +1], \quad (23)$$

Le PWM approxime cette valeur par une fonction à valeurs discrètes

$$S(t) \in [-1, +1], \quad (24)$$

de sorte que la valeur moyenne sur la période  $T_S$  de commutation soit égale à la valeur souhaitée, comme illustré ci-dessous :

$$S = \frac{1}{T_S} \int_{kT_S}^{(k+1)T_S} S(t) dt = S^* \quad (25)$$

On peut calculer la valeur désirée réelle comme suit :

$$u^* = s^* U_d \quad (26)$$

La méthode la plus simple pour générer un signal PWM consiste à comparer le signal de référence avec une forme d'onde triangulaire ou en dents de scie à l'aide d'un comparateur. Lorsque la valeur du signal de référence dépasse celle de la forme d'onde de modulation, le PWM passe à l'état haut ; sinon, il reste à l'état bas. La Figure 2.5 illustre la génération de PWM avec une forme d'onde de modulation triangulaire et un signal de référence constant [9].

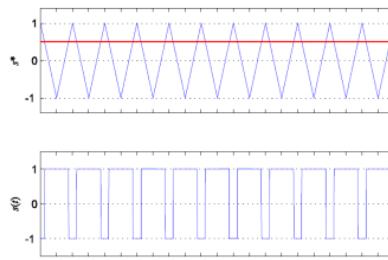


Figure 2.5: Principe de la modulation de largeur d'impulsion

Les points d'intersections entre la porteuse et la référence (modulante) définissent les instants d'allumage et d'extinction des interrupteurs

L'ensemble du mécanisme peut être simplement illustré dans la Figure.

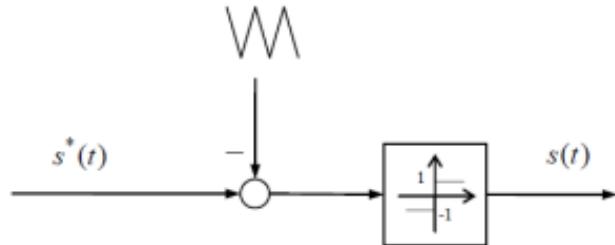


Figure 2.6: Réalisation de la modulation de largeur d'impulsion par modulation triangulaire porteuse et un comparateur.

### 2.3.3 Commutation

Pour piloter un moteur BLDC, il est nécessaire de connaître la position réelle du rotor. Dans certains types de moteurs BLDC, trois capteurs à effet Hall sont utilisés, placés à des intervalles de 120 degrés sur le stator. En tournant, le rotor génère trois signaux distincts avec un décalage de phase de 120 degrés et une durée de 180 degrés. Chaque capteur produit un front montant et descendant lorsque les pôles magnétiques du rotor passent devant les capteurs. Les signaux de contre-EMF et les signaux à effet Hall sont présentés dans la Figure. Comme illustré dans la Figure, le fonctionnement courant d'un moteur

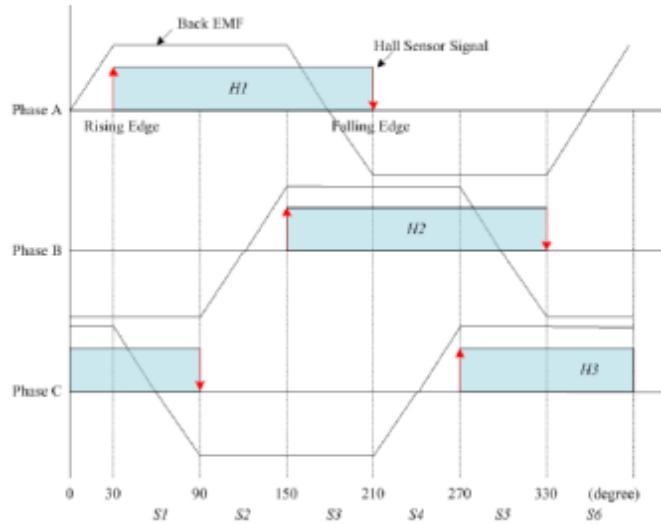


Figure 2.7: Signaux de force contre-électromotrice (FCEM) et de capteurs à effet Hall

BLDC se déroule en six étapes. La synchronisation des deux signaux permet de construire une table de recherche de séquences pour les paires de phases conductrices à chaque étape distincte. Les séquences de commutation requises pour l'onduleur peuvent être extraites de la table de recherche présentée dans le Tableau. Le courant dans chaque phase est bloqué pendant 60 degrés après un intervalle de conduction

de 120 degrés, comme mis en œuvre dans le Tableau ; il est connu que le contreEMF atteint sa valeur maximale lorsque le courant circule à travers la phase correspondante.

Seq	H1	H2	H3	Phase a	Phase b	Phase c
1	1	0	1	$+\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$	NC
2	1	0	0	$+\frac{U_{dc}}{2}$	NC	$-\frac{U_{dc}}{2}$
3	1	1	0	NC	$+\frac{U_{dc}}{2}$	$-\frac{U_{dc}}{2}$
4	0	1	0	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$+\frac{U_{dc}}{2}$	NC
5	0	1	1	$-\frac{U_{dc}}{2}$	NC	$+\frac{U_{dc}}{2}$
6	0	0	1	NC	$-\frac{U_{dc}}{2}$	$+\frac{U_{dc}}{2}$

Avant d'appliquer ces signaux de commande de grille, il est nécessaire de trouver un moyen de les combiner avec le signal PWM. Cela signifie que chaque signal de commande de grille basé sur les signaux à effet Hall est commuté par un signal PWM à fréquence plus élevée. En procédant ainsi, nous pouvons contrôler la tension appliquée au moteur en modifiant le cycle de service du PWM. Plus de détails seront donnés dans les sections suivantes.

## 2.4 SIMULINK/MATLAB Models

Le modèle principal du moteur BLDC triphasé, construit à l'aide de Matlab/Simulink conformément au modèle mathématique précédemment dérivé. Le modèle Simulink est illustré comme suit dans la figure 2.8 .Ce modèle intègre les capteurs à effet Hall pour détecter la position du rotor, ainsi qu'un signal PWM à haute fréquence pour contrôler les signaux de commande des grilles des phases du moteur.

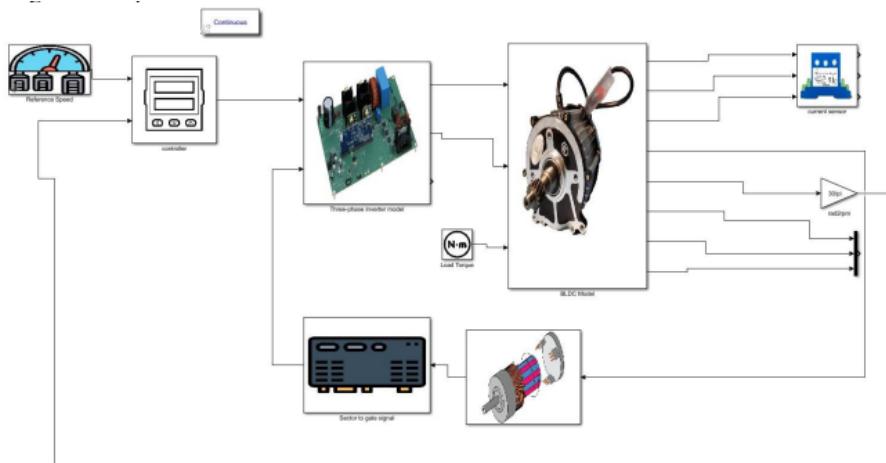


Figure 2.8: Entraînement électrique complet d'un moteur BLDC.

### Méthode de Contrôle Proposée

Puisque ce travail concerne les véhicules électriques, le principal enjeu est de contrôler la vitesse. Étant donné que le courant peut dépasser la valeur maximale admissible du moteur, un contrôleur de courant est également introduit pour le maintenir en dessous d'une limite. La méthode de contrôle anti-windup est utilisée pour améliorer la réponse du système.

La structure de contrôle du moteur est illustrée à la Figure 2.9. Comme on peut le voir, le couple nécessaire pour atteindre la vitesse désirée est généré par un contrôleur de vitesse. Le courant proportionnel à ce couple est limité par le courant maximal du moteur avant d'être appliqué au contrôleur de courant. Cela garantit que le courant sera maintenu dans la plage admissible pour le moteur. Une constante de temps est également prise en compte, se référant aux délais apparaissant dans le système en raison des capteurs, des circuits de commutation et de la mise en œuvre du contrôle[10].

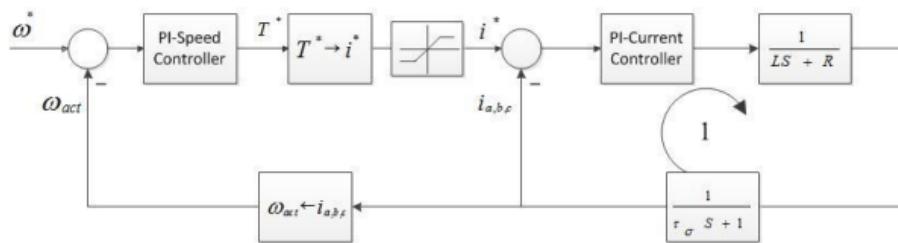


Figure 2.9: Diagramme fonctionnel décrivant le système

### Le Régulateur de Vitesse PI

Un régulateur de type PI est employé comme contrôleur de vitesse, comme indiqué dans la Figure 2.10. Les coefficients du régulateur sont déterminés à l'aide de MATLAB en utilisant l'outil TUNEL (Tuning and Evaluation of Nonlinear Control Systems). TUNEL permet d'ajuster de manière optimale les paramètres du régulateur en prenant en considération les spécifications du système ainsi que les performances requises. Cette approche garantit une réponse efficace du contrôleur dans une gamme variée de conditions opérationnelles, assurant ainsi une régulation stable et précise de la vitesse du moteur.

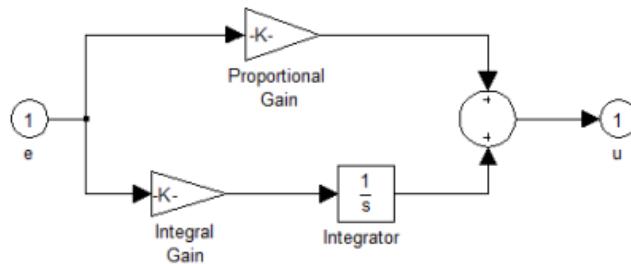


Figure 2.10: Régulateur de vitesse PI

### 2.4.2 Analyse des performances d'un moteur BLDC :

Une analyse détaillée des performances d'un moteur BLDC a été réalisée en utilisant des outils de modélisation avancés tels que MATLAB et Simulink. Cette étude a permis d'évaluer différents aspects du moteur, notamment son couple de sortie, sa vitesse de rotation, son efficacité énergétique ainsi que sa réponse dynamique face à diverses charges et conditions de fonctionnement.

#### Courants de phase

Les courants des phases Ia, Ib et Ic, qui présentent une forme sinusoïdale, indiquant un fonctionnement normal de l'onduleur, sont représentés dans la Figure 2.11 en l'absence de défaut. Cependant, des oscillations sont observées dans les courants de charge, comme illustré dans la figure 2.11. Ces fluctuations sont courantes dans les onduleurs à deux niveaux et peuvent causer des perturbations indésirables dans le système.

Les oscillations observées sont causées par les commutations rapides des semi-conducteurs de puissance utilisés dans l'onduleur, ce qui génère des harmoniques indésirables dans les courants de sortie.

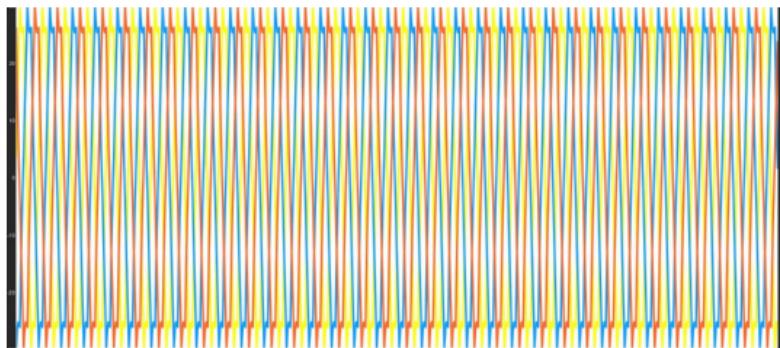


Figure 2.11: Formes d'ondes des courants de phase d'un moteur BLDC

#### Caractéristiques de vitesse/temps

La Figure 2.12 illustre la réponse du système à la valeur donnée de  $\omega_m^*$  qui est [800 1500 400].

Au début, la vitesse du moteur est de 600 tr/min. Lors de la première commande de 800 tr/min, on observe une réponse transitoire rapide avec quelques oscillations avant la stabilisation à 800 tr/min, montrant une bonne performance en termes de temps de réponse et de stabilité.

Ensuite, l'augmentation à 1500 tr/min provoque un pic initial et quelques oscillations avant de se stabiliser à 1500 tr/min. Ce comportement transitoire est probablement dû à l'inertie du moteur et à la dynamique du contrôleur.

Enfin, une réduction à 400 tr/min montre encore une réponse transitoire avec des oscillations avant la stabilisation à 400 tr/min.



Figure 2.12: Caractéristiques de vitesse/temps en boucle fermée

Même en changeant le couple résistant à 10 N.m, la courbe de réponse du système reste la même. Cela indique que le système de contrôle du moteur est robuste et capable de maintenir une performance stable et efficace malgré les variations du couple résistant. Les oscillations transitoires et le temps de stabilisation restent constants, démontrant une bonne capacité du contrôleur à compenser les changements de charge sans compromettre la stabilité ou la précision de la vitesse de consigne.

#### Forme d'onde de la contre-électromotrice

La Figure 2.13 montre la forme d'onde trapézoïdale de la contre-électromotrice. Nous avons ici considéré le mode de fonctionnement à 1200. Les contre-électromotrices sont développées dans l'enroulement statorique en raison de l'inductance mutuelle entre l'aimant permanent et l'enroulement statorique. En raison de la forme trapézoïdale de la contreélectromotrice, le couple développé par le moteur BLDC est constant et présente moins de fluctuations que la contre-électromotrice sinusoïdale.

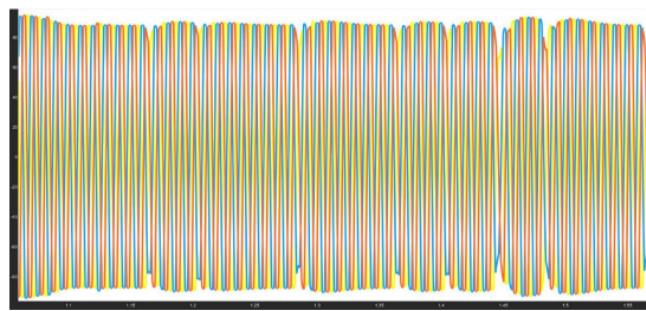


Figure 2.13: Formes d'onde de la contre-électromotrice

#### 2.4.3 Cas de fonctionnement avec un défaut de circuit ouvert de l'onduleur

De manière générale, le régime de défaut en circuit ouvert pour n'importe quel mode est obtenu en bloquant l'IGBT du bras de la phase concernée par le défaut à l'état ouvert ( $Si=0$ ). Cette procédure consiste à ouvrir l'interrupteur du transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) de la phase défectueuse, ce qui empêche le courant de circuler dans cette phase.

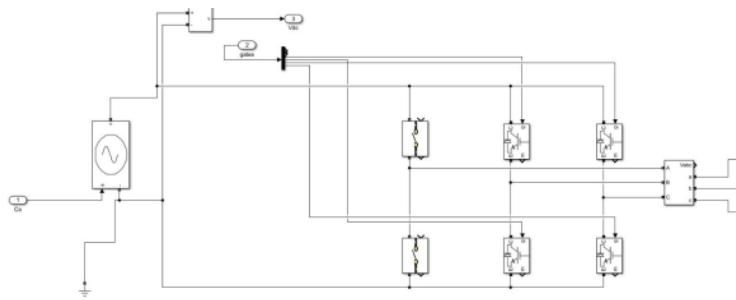


Figure 2.14: Modèle de simulation de l'onduleur en présence de défaut (circuit ouvert)

#### 2.4.4 Analyse des performances d'un moteur BLDC avec des défauts:

##### 1 Courants de phase avec défaut dans T1T2

Dans le cas où un défaut se produit dans les deux interrupteurs du même bras de l'onduleur, on observe des effets significatifs sur les courants de phase du système. Plus précisément, le courant de la phase défectueuse est annulé, ce qui signifie qu'il chute à zéro en raison de l'incapacité des interrupteurs à conduire le courant correctement. Cette situation peut être causée par un court-circuit ou une panne des interrupteurs, empêchant ainsi le passage du courant dans la phase affectée.

Simultanément, l'amplitude des courants des deux autres phases augmente considérablement. Cette augmentation est due au déséquilibre créé par le défaut, qui redistribue le courant initialement destiné à la phase défectueuse vers les autres phases. Ce phénomène peut entraîner une surcharge des composants restants de l'onduleur, mettant ainsi à risque leur intégrité et leur fonctionnement.

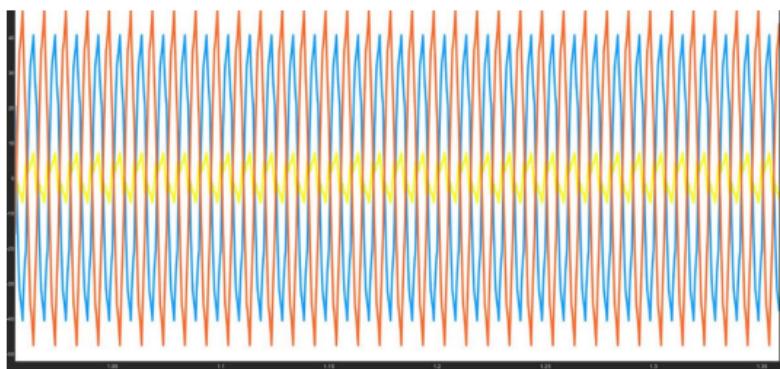


Figure 2.15: Les courants Iabc en présence de défaut dans les interrupteurs T1T2

#### Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation du système d'entraînement de moteur BLDC. Le modèle est développé dans SIMULINK/MATLAB. En utilisant des régulateurs PI la vitesse, le moteur est capable de suivre la vitesse souhaitée. De plus, le courant du moteur est maintenu en dessous d'une limite maximale. Le moteur est également capable de maintenir sa vitesse malgré les variations de charge. De plus en effectuer certain.

# Chapter 3: Analyse et Détection des Défauts dans les Onduleurs Triphasés par Apprentissage Automatique

## Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'analyse des défauts présents dans les onduleurs triphasés. Nous avons identifié différents types de défauts et étudié leur impact sur les moteurs BLDC. En parallèle, nous avons extrait les caractéristiques de ces défauts afin de constituer une base de données destinée à l'entraînement de modèles de machine learning. Cette base de données est essentielle pour la détection et le diagnostic précis des défauts. De plus, nous avons développé un réseau de neurones pour détecter ces défauts, améliorant ainsi la précision et la rapidité du diagnostic.

### 3.1 Structure du Système de Détection de Défauts

La détection des défauts dans un système onduleur triphasé repose principalement sur le courant de charge de sortie, capté à l'aide de capteurs et soumis à un échantillonnage pour traitement. Pour maximiser l'efficacité du processus, nous avons développé une technique avancée d'extraction des caractéristiques. Cette méthode permet de tirer le meilleur parti des caractéristiques opérationnelles du système en diverses conditions de défaut. Les résultats sont compilés dans une table détaillant les valeurs des vecteurs caractéristiques pour chaque scénario de défaut, utilisée ensuite pour l'entraînement d'un réseau de neurones spécialisé dans la détection et le diagnostic des défauts. La Figure 3.1 illustre le diagramme fonctionnel de ce système.

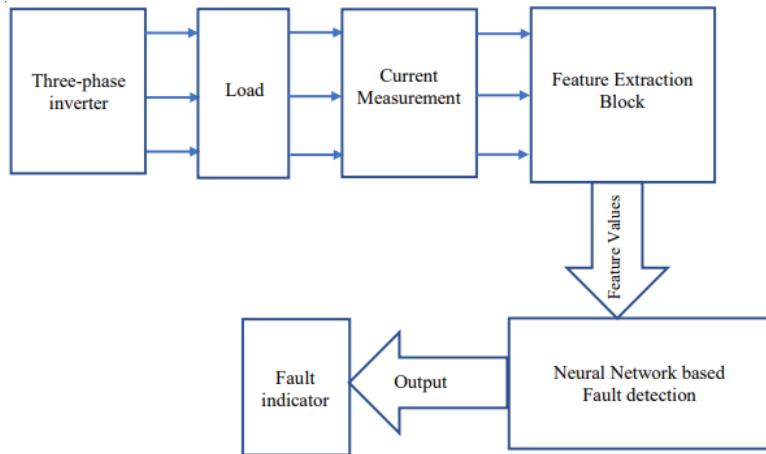


Figure 3.1: Diagramme en blocs du système proposé.

### 3.2 Feature Extraction

L'extraction des caractéristiques constitue le cœur du processus de détection et de classification des défauts. Des caractéristiques de haute qualité sont essentielles pour garantir des performances optimales et la fiabilité du système. Pour intégrer cette méthode dans notre environnement de simulation, nous avons choisi d'utiliser Matlab/Simulink. Cette plateforme offre un contrôle précis et une mesure dynamique des aspects critiques du système, assurant ainsi l'exactitude et la fiabilité nécessaires à notre processus.

d'extraction des caractéristiques. Ce processus transforme les données brutes des capteurs en paramètres significatifs qui permettent de caractériser les divers états de défaut rencontrés dans l'onduleur triphasé.

### 3.2.1 Configuration de la Simulation et Acquisition des Données

La configuration de la simulation et l'acquisition des données, l'onduleur triphasé est implémenté avec la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (MLI) dans Simulink. Nous avons introduit délibérément des défauts de circuit ouvert dans différents interrupteurs de l'onduleur pour évaluer leur impact. Les courants  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$  ont été mesurés en temps réel tout au long de la simulation.

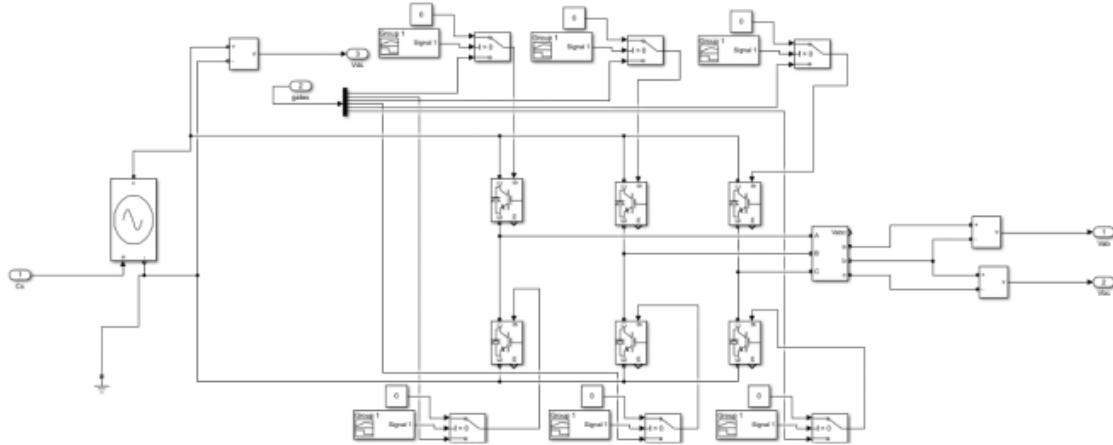


Figure 3.2: Onduleur triphasé basé sur Simulink avec signaux de création de défauts

Cette acquisition a été effectuée en utilisant la fonction "To Workspace" de Simulink, permettant de stocker les données de courant en temps réel dans des fichiers Excel dédiés à chaque type de défaut. Cette approche nous a permis d'analyser précisément les variations de courant et d'évaluer la réponse de l'onduleur sous différents scénarios de défaillance, enrichissant ainsi notre compréhension des performances du système dans des conditions réalistes.

### 3.2.2 Extraction des Valeurs Moyennes des Courants

Les signaux de courant  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$  ont été acquis et traités pour obtenir leurs valeurs moyennes sur des intervalles de temps spécifiques. Ces valeurs moyennes, notées  $I_a(\text{mean})$ ,  $I_b(\text{mean})$  et  $I_c(\text{mean})$ , sont cruciales pour caractériser le comportement global du courant du système dans différents scénarios de défaut. Le calcul de ces valeurs moyennes a été réalisé à l'aide de fonctions Matlab personnalisées selon cette équation :

$$I_a(\text{mean}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_a$$

$$I_b(\text{mean}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_b$$

$$I_c(\text{mean}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_c$$

### 3.2.3 Calcul des Angles pour les Points Moyens

La prochaine caractéristique à extraire est l'angle de chaque moyenne par rapport à son axe. L'angle par rapport à la valeur moyenne nous donne la position exacte de ce point dans l'espace tridimensionnel. Six angles sont calculés pour chaque point en fonction des trois valeurs moyennes  $I_a(\text{mean})$ ,  $I_b(\text{mean})$  et  $I_c(\text{mean})$  pour des cas spécifiques de défaut ou de fonctionnement normal. Les équations suivantes décrivent le calcul de ces angles. La Figure illustre ces angles dans un espace bidimensionnel pour une meilleure compréhension.

$$\text{atanBA} = \tan^{-1} \left( \frac{I_b(\text{mean})}{I_a(\text{mean})} \right)$$

$$\text{atanCA} = \tan^{-1} \left( \frac{I_c(\text{mean})}{I_a(\text{mean})} \right)$$

$$\text{atanAC} = \tan^{-1} \left( \frac{I_a(\text{mean})}{I_c(\text{mean})} \right)$$

$$\text{atanBC} = \tan^{-1} \left( \frac{I_b(\text{mean})}{I_c(\text{mean})} \right)$$

$$\text{atanAB} = \tan^{-1} \left( \frac{I_a(\text{mean})}{I_b(\text{mean})} \right)$$

$$\text{atanCB} = \tan^{-1} \left( \frac{I_c(\text{mean})}{I_b(\text{mean})} \right)$$

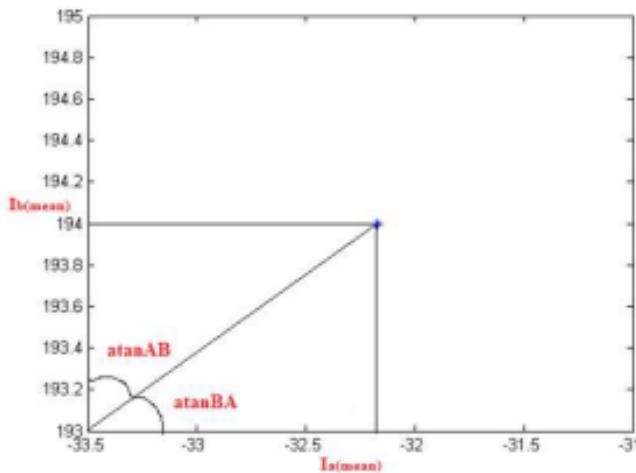


Figure 3.3: Mesure d'angle dans un espace bidimensionnel

### 3.2.4 Fault Table Based on Extracted Features

La dernière étape de l'extraction des caractéristiques consiste à construire une table de défauts qui répertorie les valeurs caractéristiques respectives pour chaque cas de défaut. Ces valeurs caractéristiques doivent être soigneusement notées car elles seront utilisées pour entraîner le réseau de neurones dans les étapes suivantes. La table des défauts est présentée dans le Tableau.

Fault	Mean_Ia	Mean_Ib	Mean_Ic	atanBA	atanCA	atanAC	atanBC	atanAB	atanCB
NORMAL	19,264	6,8244	-26,088	19,505	-53,556	143,556	165,341	70,494	-75,341
T1	-3385,508	1989,449	1396,059	149,559	157,590	-67,590	54,941	-59,559	35,0585
T2	5878,014	-3383,246	-2494,767	-29,923	-22,997	112,997	-126,404	119,923	-143,595
T3	1752,094	-4132,225	2380,130	-67,022	53,641	36,358	-60,058	157,022	150,0583
T4	-426,132	1170,902	-744,769	109,998	-119,776	-150,223	122,459	-19,998	-32,459
T5	2736,832	2193,253	-4930,085	38,708	-60,964	150,964	156,017	51,291	-66,017
T6	-3341,956	-2653,536	5995,493	-141,550	119,135	-29,135	-23,873	-128,449	113,873
T1andT2	1,739	-18,454	16,715	-84,616	84,060	5,939	-47,830	174,616	137,830
T3andT4	27,640	-2,846	-24,794	-5,878	-41,893	131,893	-173,452	95,878	-96,547
T5andT6	36,442	-42,416	5,973	-49,332	9,309	80,690	-81,983	139,332	171,983
T2andT3	10089,048	-11335,843	1246,795	-48,330	7,044	82,955	-83,723	138,330	173,723
T3andT5	4183,0785	-1637,934	-2545,144	-21,383	-31,317	121,317	-147,236	111,383	-122,763
T4andT6	-3468,646	1269,373	2199,272	159,899	147,623	-57,623	29,992	-69,899	60,007
T2andT4	1461,370	2236,482	-3697,853	56,838	-68,436	158,436	148,834	33,161	-58,834
T1andT5	-2379,668	3809,540	-1429,871	121,991	-148,999	-121,0003	110,573	-31,991	-20,573
T1andT2andT5	165466,366	89661,119	-255127,486	28,451	-57,034	147,0340	160,636	61,548	-70,636
T4andT5andT6	-50375,299	151357,653	-100982,353	108,408	-116,512	-153,487	123,710	-18,408	-33,710
T1andT2andT3	6141,649	-6064,565	-77,083	-44,638	-0,719	90,719	-90,728	134,638	-179,271
T2andT3andT6	29,673	-14,871	-14,802	-26,618	-26,511	116,511	-134,867	116,618	-135,132

### 3.3 Limitations des Ensembles de Données Restreints pour la Détection des Défauts en Machine Learning

L'une des principales préoccupations lorsqu'on travaille avec un petit ensemble d'entraînement est la capacité limitée à représenter adéquatement la diversité des situations de défauts. Notre ensemble de données contient des mesures de courants moyens  $I_a$ (mean),  $I_b$ (mean), et  $I_c$ (mean) et des angles (atanBA, atanCA, atanAC, atanBC) pour différents scénarios de défauts et de fonctionnement normal. Bien que ces informations soient cruciales pour la détection et le diagnostic des défauts, un nombre restreint d'exemples peut limiter la généralisation des modèles de machine learning.

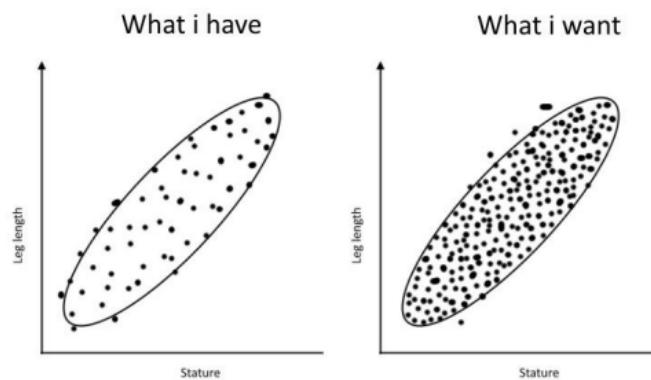


Figure 3.4: Limitations des Ensembles de Données

Les valeurs moyennes des courants et les angles associés fournissent une base solide pour caractériser les différents états du système. Cependant, un petit ensemble d'entraînement augmente le risque de surapprentissage, où le modèle devient trop spécifique aux exemples de formation disponibles et ne parvient

pas à généraliser correctement à de nouveaux cas. Par exemple, les défauts comme T1, T2, et leurs combinaisons T1 et T2 , T1 et T5 peuvent ne pas couvrir toute la diversité des défaillances possibles dans un onduleur triphasé.

De plus, la variabilité naturelle des mesures peut être sous-estimée dans un petit ensemble d'entraînement. Les angles comme atanBA et atanCA sont essentiels pour comprendre l'orientation spatiale des courants, mais un échantillonnage limité risque de ne pas capturer toutes les variations possibles. Par exemple, les angles mesurés pour le cas T2 ( -29.92 pour atanBA et -22.99 pour atanCA) peuvent ne pas être représentatifs de toutes les variations possibles de ce type de défaut.

Enfin, un petit ensemble d'entraînement réduit la capacité à capturer les interactions complexes entre les différents types de défauts. Notre tableau inclut des combinaisons de défauts T1 et T2, T2 et T3, etc.) qui sont cruciaux pour entraîner un modèle capable de détecter des scénarios de défaillance multiples. Cependant, si ces combinaisons ne sont pas suffisamment représentées, le modèle peut avoir du mal à reconnaître et diagnostiquer ces cas complexes dans des données nouvelles.

### 3.3.1 Méthodes Utilisées pour Résoudre le Problème de l'Ensemble de Données d'Entraînement Limité

Lors de l'entraînement de modèles de machine learning, un ensemble de données d'entraînement limité peut poser des défis importants en termes de capacité de généralisation et de risque de surapprentissage. Pour surmonter ces limitations, plusieurs techniques d'augmentation des données ont été employées afin de diversifier et d'élargir notre ensemble de données.

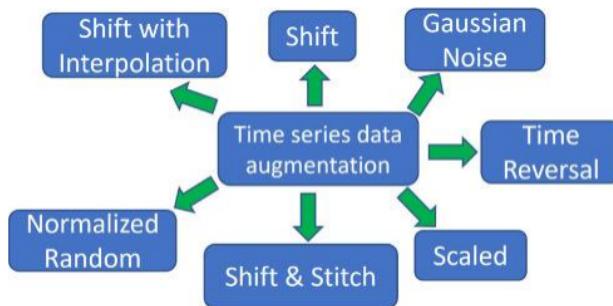


Figure 3.5: méthodes d'augmentation des données

#### Ajout de Bruit Aléatoire

L'idée derrière l'ajout de bruit gaussien est qu'ajouter une petite quantité de variation aux séries chronologiques ne les modifie probablement pas de manière significative, mais augmente le nombre de ces échantillons bruités dans notre ensemble de données. Cela rend souvent les modèles ultérieurs plus robustes aux échantillons bruités ou améliore les performances prédictives.

Les hyperparamètres du bruit gaussien et la manière d'ajouter le bruit (par exemple, le bruit gaussien peut augmenter vers la fin d'une série chronologique) posent une question complexe et dépendent d'un ensemble de données particulier et du problème ultérieur. Il vaut souvent la peine d'expérimenter et de voir comment ces paramètres affectent les performances du modèle cible.

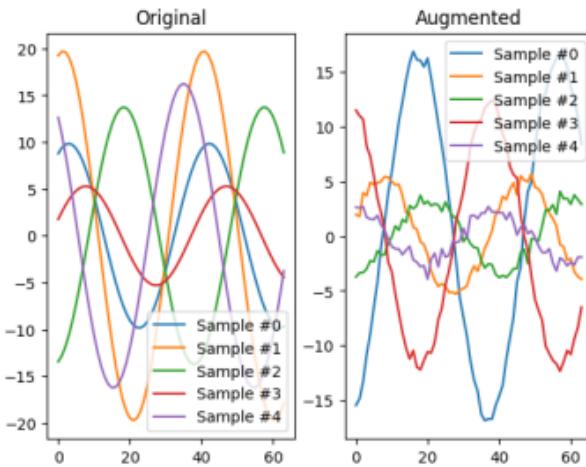


Figure 3.6: Noise augmentation méthode

### Interpolation des données

L'interpolation des données est une méthode couramment utilisée en science des données et en apprentissage automatique pour augmenter la quantité de données disponibles en créant de nouveaux points de données entre les points existants. Cette technique est particulièrement utile lorsqu'on dispose d'un ensemble de données limité et qu'on souhaite améliorer la performance des modèles prédictifs.

L'interpolation fonctionne en estimant les valeurs intermédiaires entre des points de données connus. Dans ce processus, on utilise des méthodes mathématiques pour "interpoler" ou estimer les valeurs des nouvelles données basées sur les tendances observées dans les données d'origine.

L'interpolation des données présente plusieurs avantages. Elle permet de densifier un dataset, ce qui peut aider les modèles à mieux comprendre les relations et les tendances dans les données. Cela peut conduire à une meilleure généralisation et à des prédictions plus précises. De plus, en créant de nouvelles instances de données qui conservent la structure et les caractéristiques des données d'origine, l'interpolation permet de renforcer la robustesse des modèles face aux variations des données réelles.

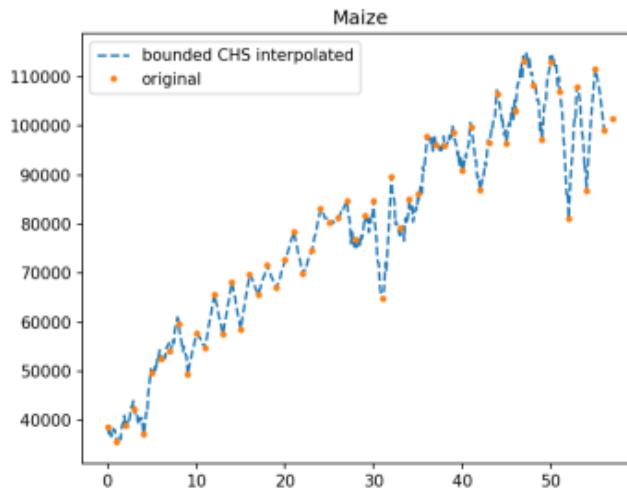


Figure 3.7: Méthode d’interpolation

### Combinaison des fautes (Fault Combination)

La combinaison des fautes est une méthode d’augmentation de données utilisée pour enrichir les ensembles de données en combinant les effets de différentes fautes ou anomalies. Cette approche est particulièrement utile dans les domaines de la maintenance prédictive, de la détection de défauts et des systèmes de diagnostic, où les exemples de différentes fautes peuvent être rares ou coûteux à obtenir.

#### 3.3.2 Combinaison de Méthodes d’Augmentation des Données

En combinant plusieurs techniques d’augmentation des données, telles que l’ajout de bruit, l’interpolation linéaire et la combinaison de fautes, il est possible de transformer un ensemble de données initialement limité en un dataset beaucoup plus vaste et diversifié. Par exemple, en partant d’un ensemble de 20 points de données initiaux, ces méthodes permettent d’augmenter le volume de données jusqu’à atteindre environ 100 000 points de données.

## 3.4 Réseaux de neurones artificiels

### 3.4.1 Définition

Les réseaux de neurones artificiels, également appelés réseaux connexionnistes, sont construits sur des modèles inspirés par les cellules et les interconnexions du cerveau humain. Leur objectif global est d’effectuer des calculs complexes et d’apprendre à identifier des relations non linéaires entre des données numériques et divers paramètres.

### 3.4.2 Le neurone biologique

Le neurone constitue l’unité fondamentale du système nerveux central. Le cerveau est composé d’environ mille milliards de neurones, chacun ayant entre 1000 et 10000 synapses (connexions) avec d’autres neurones.

Les neurones sont interconnectés par des axones, qui jouent un rôle crucial dans le traitement logique global du système. Les axones transmettent les signaux électriques de la sortie d'un neurone à l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones effectuent une sommation des signaux reçus en entrée et, en fonction du résultat, génèrent un courant de sortie[11].

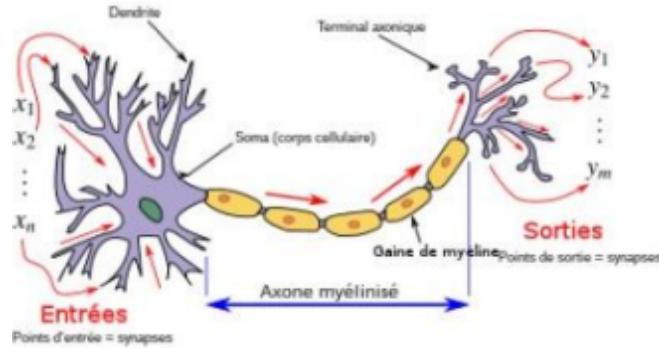


Figure 3.8: Schéma d'un neurone biologique

### 3.4.3 Neurone formel

Un neurone est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée et bornée. Selon McCulloch et Pitts, un neurone formel ou artificiel est un opérateur mathématique simple qui a une seule sortie et un nombre variable d'entrées, pouvant provenir d'autres neurones ou de signaux externes. Sa sortie est déterminée par la somme pondérée des entrées, chaque poids étant attribué à une connexion synaptique, suivie de l'application d'une fonction non linéaire appelée fonction d'activation. Les caractéristiques essentielles d'un neurone incluent son état, ses connexions avec d'autres neurones, et sa fonction d'activation. Lorsqu'il est activé, le neurone transmet une réponse correspondant à son état d'activation aux neurones suivants ; s'il reste inactif, il ne transmet aucun signal. De manière plus générale, un neurone formel peut être défini

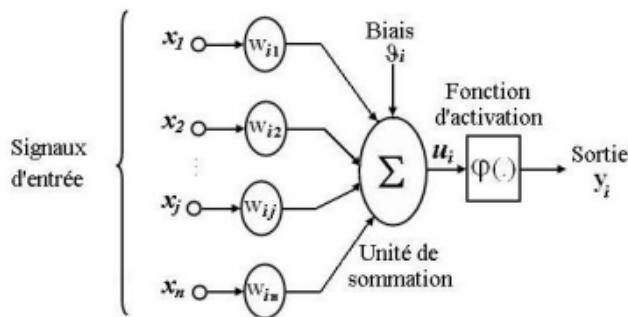


Figure 3.9: Schéma d'un neurone formel

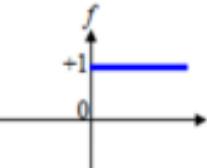
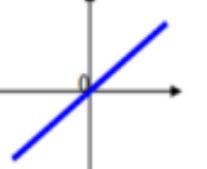
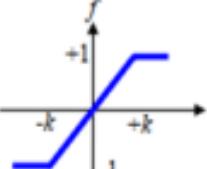
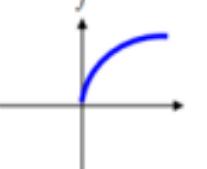
par cinq éléments essentiels :

- Les caractéristiques de ses entrées ;
- La fonction d'entrée totale qui décrit le traitement initial appliqué aux entrées ;
- La fonction d'activation du neurone, déterminant son état interne en fonction de l'entrée totale ;

- La fonction de sortie, calculant la sortie du neurone en fonction de son état d'activation ;
- Les caractéristiques de la sortie du neurone.

### 3.4.4 Fonction d'activation

La fonction d'activation est typiquement une fonction non linéaire monotone croissante. Par ailleurs, les fonctions de transfert varient en qualité, pouvant être déterministes, continues, discontinues ou aléatoires, comme illustré dans le tableau suivant.

Classe	Type	Equation mathématique	Allure
Seuil	Binaire (Heaviside)	$f(x) = 1 \text{ si } x < 0$ $f(x) = 0 \text{ si } x \leq 0$	
	Signe	$f(x) = 1 \text{ si } x > 0$ $f(x) = -1 \text{ si } x \leq 0$	
Linéaire	Identité	$f(x) = x$	
	Saturation	$f(k, x) = -1 \text{ si } x < -1/k$ $f(k, x) = 1 \text{ si } x \geq 1/k$ $f(k, x) = kx \text{ sinon}$	
Sigmoïde	Positive(logistique)	$f(k, x) = \frac{1}{1 + e^{kx}}$	
	Symétrique (tangente)	$f(k, x) = \frac{1}{1 + e^{kx}} - 1$	

## 3.5 Architecture des réseaux de neurones

L'architecture d'un réseau de neurones fait référence à la manière dont les neurones sont connectés pour former un réseau. On distingue généralement trois types d'architectures de réseaux de neurones :

- Les réseaux non récurrents ou réseaux unidirectionnels (feedforward networks) : Ces réseaux organisent leurs neurones en une ou plusieurs couches successives. L'information circule de la couche d'entrée vers la couche de sortie à travers d'éventuelles couches intermédiaires, sans rétroaction. Le perceptron adopte ce type d'architecture.

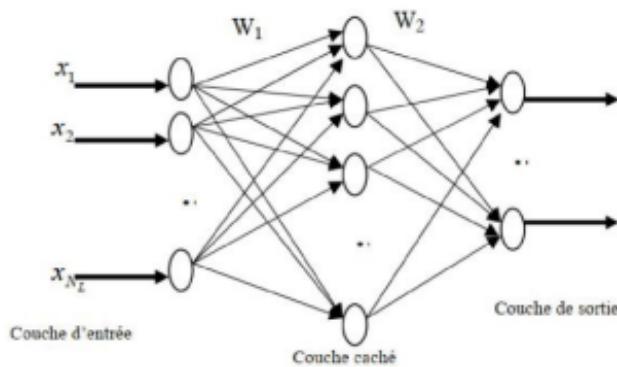


Figure 3.10: Un réseau de neurone non bouclé

- Les réseaux bouclés ou réseaux récurrents (recurrent networks) présentent une structure similaire à celle des réseaux unidirectionnels, mais ils sont enrichis par des connexions entre les éléments de la même couche ou vers des couches antérieures. Ces réseaux sont particulièrement puissants car leur fonctionnement est séquentiel, ce qui leur permet d'adopter un comportement dynamique.

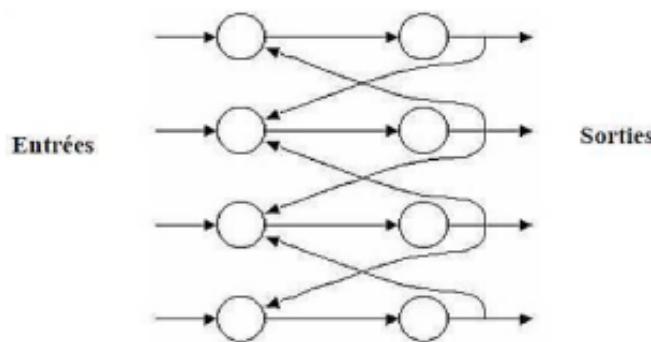


Figure 3.11: Un RNA bouclé (à connexions récurrentes)

- Dans la catégorie des réseaux à connexions complexes se trouvent tous les réseaux qui ne correspondent pas aux deux catégories précédemment mentionnées. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer les SOM (Self Organizing Map), LVQ (Learning Vector Quantization), ART (Adaptive Resonance Theory), RCE (Restricted Coulomb Energy) et les réseaux probabilistes.

### 3.5.1 Avantages des techniques intelligentes

Les techniques d'intelligence artificielle appliquées au contrôle présentent plusieurs avantages :

- Leur conception ne nécessite pas de modèles mathématiques du processus à contrôler.
- Elles améliorent les performances du contrôle par rapport à certaines techniques classiques.
- Elles peuvent tirer parti de l'expertise humaine.

## 3.6 Utilisation de réseaux de neurones pour la détection de défauts de circuit ouvert des IGBTs

Le diagnostic des défauts de circuit ouvert de chaque IGBT repose sur deux méthodes basées sur l'intelligence artificielle dans cette section :

1. La première méthode utilise l'extraction des valeurs moyennes du courant des défauts de circuit ouvert des IGBT, basée sur un réseau de neurones.
2. Le deuxième aspect concerne le calcul des angles pour les points moyens des défauts de circuit ouvert des IGBT, également basé sur un réseau de neurones.

### 3.6.1 Étude de réseau de neurone utilisé

- Élaboration du bloc RNA,
- Acquisition des données (base d'apprentissage qui est déjà faite),
- Test du réseau.

### 3.6.2 Construction du réseau de neurones

**Une couche d'entrée :** Cette couche est constituée de neuf neurones chargés de transmettre les caractéristiques d'entrée correspondant aux variables ( $I_{mean}$  et  $Arctang(I_{mean})$ ) vers la couche suivante, appelée couche cachée.

**Deux couches cachées :** La première couche cachée est équipée de 50 neurones et la deuxième de 1 neurone, utilisant des fonctions d'activation de type sigmoïde.

**Une couche de sortie :** Cette couche est composée d'un seul neurone,

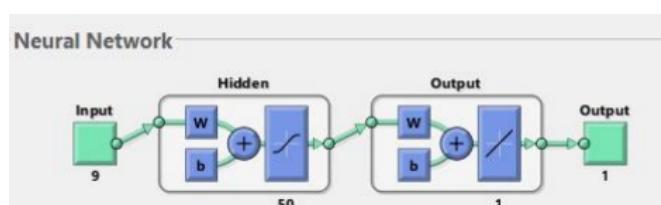


Figure 3.12: Construction des blocs RNA

La construction et la validation des réseaux de neurones se déroulent en trois phases distinctes:

### Choix des entrées des réseaux

Les entrées du réseau de neurones artificiels (RNA) comprennent les valeurs moyennes des courants de phase ( $I_a, I_b, I_c$ ) ainsi que les déphasages entre ces courants de phase : ( $BA, CA, AC, BC, AB, CB$ ). Par conséquent, le réseau comporte un total de 9 entrées.

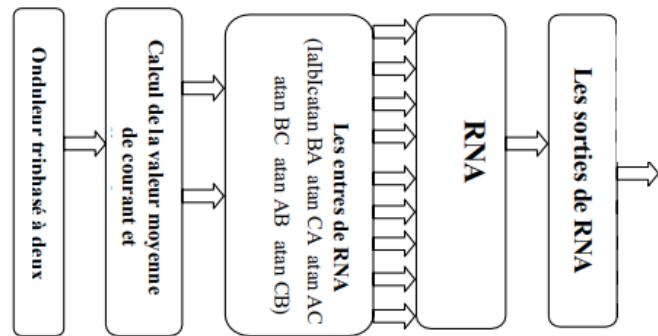


Figure 3.13: Structure du réseau de neurones utilisé

### Architecture du réseau de neurone

L'architecture du réseau de neurones étudié est illustrée par la figure. Cette architecture détaille la structure et l'organisation des différentes couches du réseau, y compris les neurones d'entrée, les couches cachées et les neurones de sortie. Elle montre comment les données d'entrée, comprenant les valeurs moyennes des courants de phase ( $I_a, I_b, I_c$ ) et les déphasages entre ces courants ( $BA, CA, AC, BC, AB, CB$ ), sont traitées et transformées à travers le réseau pour produire les résultats souhaités.

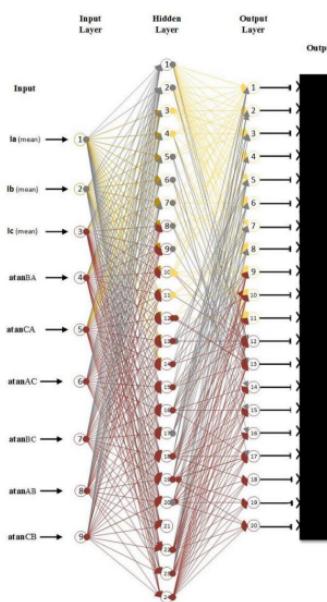


Figure 3.14: Enter Caption

## Choix des sorties du réseau

Lors de la détection d'un défaut, le réseau doit indiquer un nombre index quelconque à sa sortie qui correspond à un défaut du composant.

Dans notre travail, nous avons :

- Le nombre de sorties du réseau est égal à 1.
- Les différents défauts au niveau des composants constituant l'onduleur sont représentés sur le tableau, avec leurs index.

Fault	Index
<b>NORMAL</b>	<b>1</b>
<b>T1</b>	<b>2</b>
<b>T2</b>	<b>3</b>
<b>T3</b>	<b>4</b>
<b>T4</b>	<b>5</b>
<b>T5</b>	<b>6</b>
<b>T6</b>	<b>7</b>
<b>T1andT2</b>	<b>8</b>
<b>T3andT4</b>	<b>9</b>
<b>T5andT6</b>	<b>10</b>
<b>T2andT3</b>	<b>11</b>
<b>T3andT5</b>	<b>12</b>
<b>T4andT6</b>	<b>13</b>
<b>T2andT4</b>	<b>14</b>
<b>T1andT5</b>	<b>15</b>
<b>T1andT2andT5</b>	<b>16</b>
<b>T4andT5andT6</b>	<b>17</b>
<b>T1andT2andT3</b>	<b>18</b>
<b>T2andT3andT6</b>	<b>19</b>

## 3.7 Apprentissage de réseaux de neurones

Le système de diagnostic surveille l'amplitude des courants moyen ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ), qui sont ensuite utilisés comme entrées pour le réseau de neurones. Après avoir traité ces courants, le réseau de neurones détecte et localise les défauts. La structure de ce modèle est représentée dans le schéma Matlab/Simulink illustré ci-dessous (Figure 3.15), où les courants surveillés sont acheminés vers le réseau de neurones pour l'analyse et la détection des défauts.

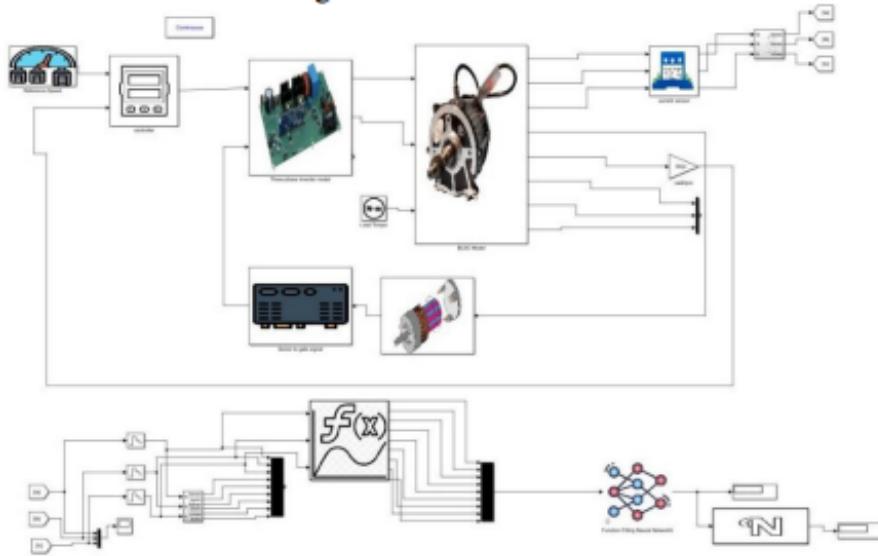


Figure 3.15: : Système de simulation de diagnostic des défauts de l'onduleur par le réseau de neurone

### 3.7.1 Résultats et interprétations

Les performances du modèle proposé ont été évaluées sur les ensembles de données d’entraînement, de validation et de test. La courbe d’apprentissage, représentée sur la figure 1, montre l’évolution de l’erreur quadratique moyenne (MSE) au fil des époques d’entraînement. On observe une décroissance progressive de l’erreur sur les données d’entraînement, atteignant des valeurs faibles, ce qui indique que le modèle parvient à bien s’ajuster à ces données.

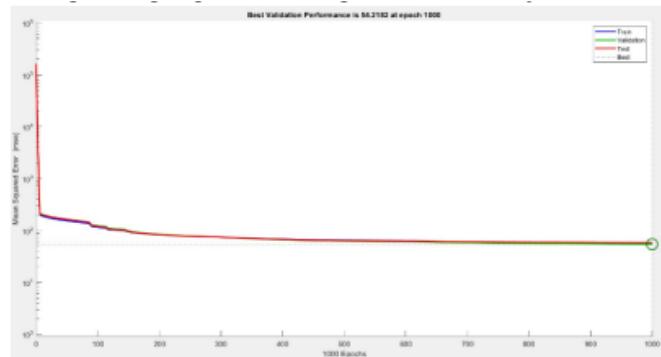


Figure 3.16: Evaluation de l’erreur quadratique en fonction du nombre d’itérations

### 3.7.2 Tests de RN utilisé

Une fois que le réseau de neurones artificiel (RNA) est construit et que son apprentissage a atteint des performances satisfaisantes, nous ajoutons une fonction pour prendre la valeur entière la plus proche. Ensuite, des tests sont réalisés pour divers modes de fonctionnement. Les résultats de ces tests sont présentés dans les figures ci-dessous.

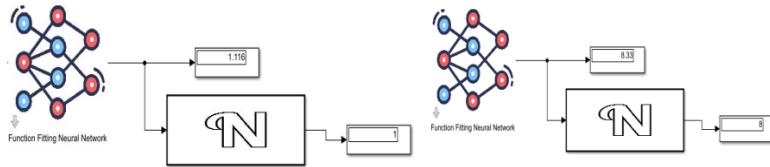


Figure 3.17: Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas normal défaut double :(a) cas normal et(b)défaut T1T2

### 3.7.3 Optimisation des Résultats avec un Décodeur Personnalisé pour la Gestion des Interrupteurs Défectueux

Les résultats obtenus avec le réseau de neurones artificiel (RNA) sont satisfaisants, mais pour améliorer la lisibilité et l'interprétation des données, nous utilisons un décodeur personnalisé. Ce décodeur est spécialement conçu pour décoder chaque indice en tenant compte de l'état de l'interrupteur défectueux. Chaque indice est en réalité un code associé, que le décodeur interprète pour extraire des informations précises. Grâce à cette approche, nous pouvons identifier plus précisément les problèmes et obtenir une compréhension plus claire des performances du système. Cette personnalisation du décodeur assure une analyse plus fine et adaptée aux spécificités de chaque interrupteur, facilitant ainsi le diagnostic et la maintenance.

Pour mieux comprendre et illustrer l'approche de décodage, voici un tableau représentant le code associé à chaque indice.

Ce tableau simplifie la lecture des indices en codes exploitables par le décodeur personnalisé :

INDEX	Normal	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1
8	0	1	1	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1	0	0
10	0	0	0	0	0	1	1
11	0	0	1	1	0	0	0
12	0	0	0	1	0	1	0
13	0	0	0	0	1	0	1
14	0	0	1	0	1	0	0
15	0	1	0	0	0	1	0
16	0	1	1	0	0	1	0
17	0	0	0	0	1	1	1
18	0	1	1	1	0	0	0
19	0	0	1	1	0	0	1

Les résultats obtenus avec le décodeur sont ensuite affichés dans une interface graphique intuitive, utilisant des LED pour indiquer clairement l'état de chaque interrupteur. Cette interface permet aux utilisateurs de visualiser facilement les données et de comprendre rapidement l'état de chaque composant, grâce à un système de signalisation visuelle immédiate et compréhensible.

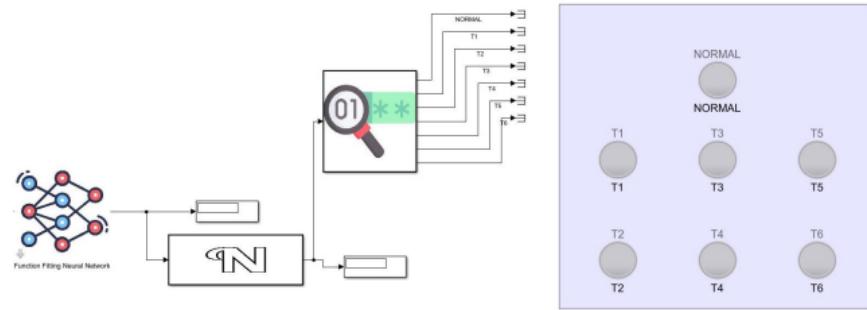


Figure 3.18: Décodeur avec interface graphique

### 3.7.4 Tests de RN utilisé avec décodeur et interface graphique

Après la construction du réseau de neurones artificiel (RNA) avec un décodeur et une interface graphique, la détection et la localisation des défauts deviennent très simples. L'intégration de ces éléments permet une identification précise et rapide des anomalies, facilitant ainsi le processus d'analyse et d'intervention comme illustre la figure 3.19.

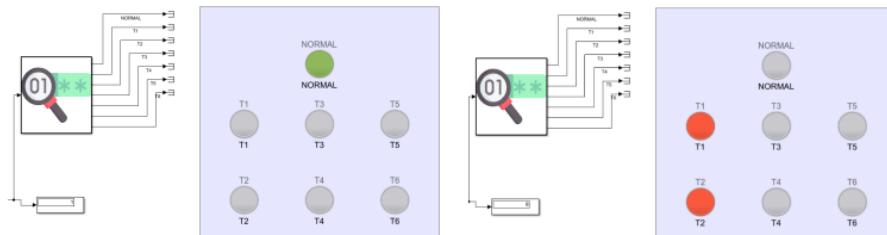


Figure 3.19: Résultats de simulation (test) du RNA pour les cas normal défaut double avec décodeur et interface graphique :(a) cas normal et(b) défaut T1T2

### Conclusion

Dans ce chapitre, un système automatique de diagnostic et de localisation des défauts de l'onduleur est proposé, basé sur l'utilisation de réseaux de neurones avancés. Ce système permet de détecter des défauts simples (défaut dans un interrupteur) ou multiples (défauts plus d'un interrupteur) de type circuit ouvert. Après sa mise en œuvre et des tests concluants, il est démontré que les résultats de détection et de diagnostic sont satisfaisants. De plus, l'algorithme d'extraction de caractéristiques est simplifié, ne nécessitant aucun calcul mathématique complexe par rapport aux techniques précédentes. Cette simplicité augmente le temps de réponse, permettant au système de détecter les défauts rapidement et avec une grande précision. Ainsi, ce système est capable de détecter et de diagnostiquer des erreurs simples ou multiples au cours d'un cycle de courant avec une précision élevée.

# Conclusion générale

En conclusion, ce projet a porté sur la conception et la mise en œuvre d'un système automatique de diagnostic et de localisation des défauts pour un onduleur triphasé en utilisant des réseaux de neurones avancés. Plusieurs étapes cruciales ont été suivies, notamment la modélisation et la simulation de l'onduleur, l'extraction des caractéristiques des courants de phase et l'entraînement d'un réseau de neurones pour la détection des défauts.

L'onduleur triphasé a été modélisé et simulé avec des défauts de circuit ouvert intentionnellement introduits, permettant de mesurer et d'analyser les courants de phase pour comprendre les variations en présence de défauts. Des méthodes avancées ont été employées pour extraire les caractéristiques essentielles du comportement du système en conditions normales et défectueuses.

Un réseau de neurones a été développé et entraîné avec des données représentatives de divers scénarios de défauts, permettant une détection précise et rapide. Les tests effectués ont démontré que le système peut détecter des défauts simples et multiples avec une grande précision et rapidité.

L'algorithme d'extraction de caractéristiques s'est avéré efficace, simplifiant le processus sans nécessiter de calculs complexes.

En résumé, le système proposé offre une solution robuste et efficace pour la détection et le diagnostic des défauts dans les onduleurs triphasés. Grâce à l'utilisation des réseaux de neurones et à la simplification des algorithmes d'extraction de caractéristiques, il est possible de détecter rapidement et précisément des anomalies, assurant ainsi une meilleure fiabilité et un temps de réponse amélioré pour les interventions nécessaires.

## References

1. A. Tounsi, *La chaîne de traction des véhicules électriques : composants et fonctionnement*, Éditions Techniques et Sciences Automobiles, 2021.
2. C. Dubois, *Technologies des batteries pour les véhicules électriques*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2019.
3. Texas Instruments. (n.d.). Battery Management Systems (BMS). Retrieved from <https://www.ti.com/power-management/battery-management/battery-monitoringcontrol/battery-management-systems-overview.html>
4. K. Johnson, *Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems*, Elsevier, 2021.
5. H. Martin, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, John Wiley & Sons, 2019.
6. M. Garcia, *Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*, CRC Press, 2018.
7. Battane, H., & Benaissa, Z. (2019). *Détection et Diagnostic de Défauts D'Un Onduleur par la Technique des Réseaux de Neurones*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Ibn-Khaldoun de Tiaret. Retrieved from <http://dspace.univtiaret.dz/bitstream/123456789/2783/1/TH.M.GE.FR.2019.33.pdf>
8. M. M. Momenzadeh, A. F. Ahmed, & A. Tolba. (2013). Simulation of BLDC Motor and Its Speed Control Using Fuzzy Logic Controller.
9. M. P. Kazmierkowski, M. Malinowski, & M. Bech. (2002). Pulse Width Modulation Techniques for Three-Phase Voltage Source Converters. In M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, & F. Blaabjerg (Eds.), *Control in Power Electronics* (pp. 89-160). Academic Press.
10. A. Vinod KR Singh Patel. (2013). Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(4), 1-14.
11. Détection et Localisation Automatique de Défaut Circuit-Ouvert d'un IGBT des Onduleurs Triphasé à Deux Niveaux à l'aide d'une Technique Combinée entre HHT-RNA.