



**République Algérienne Démocratique Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la**  
**Recherche Scientifique**



**Université Kasdi Merbah Ouargla**

**Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication**

**Département d'Electroniques et des Télécommunications**

**Mémoire MASTER**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et systèmes**

**Présenté par :**

**YAMANI Tarek**

**KAFI Lina**

**Thème :**

**Commande tolérante aux défauts avancée d'un  
convertisseur électrique multicellulaire d'une  
turbine éolienne**

**Devant le jury :**

**Mr. CHAKOUR Chouaib**  
**Mlle. SOURI Samira**  
**Dr. TOUBAKH Houari**  
**Dr. KAFI Radouane**

**Président**  
**Examinatrice**  
**Encadreur**  
**Co-Encadreur**

**UKM Ouargla**  
**UKM Ouargla**  
**UKM Ouargla**  
**UKM Ouargla**

**Année universitaire : 2019/2020**

# Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

Aux êtres les plus chers à nos cœurs, ma mère et mon père, qui nous ont beaucoup soutenus

Durant nos cursus d'étude et à qui nous serions éternellement reconnaissants

A nos frères

A nos chères sœurs.

A tous les enseignants qui nous ont aidés de près ou de loin à obtenir nos masters en Automatique.

A tous nos oncles et nos tantes.

A tous nos amis.

Enfin à tous ceux et celles qui nous ont encouragé et soutenu.

# Remerciement

Nous remercions en premier lieu, le bon DIEU qui nous a donné le courage et la patience pour parvenir à finir ce travail.

Nous exprimons ensuite notre remerciement les plus sincères à notre promoteur **Dr H. TOUBAKH** de nous avoir encadré et orienté tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier profondément les membres de jury d'avoir accepté l'évaluation de notre travail et de nous avoir prêté leur précieux temps.

Un grand merci à nos familles, pour leur soutien constant, leur présence et la confiance dont ils ont fait preuve.

Enfin, nous tenons également à remercier toute personne, ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## ملخص:

إن مجال إنتاج الكهرباء باستخدام المصادر المتجددة في تطور ملحوظ، وتتبع أنظمة طاقة الرياح من جانبها هذا الاتجاه وشهدت تطورًا ثوريًا خلال السنوات الأخيرة. مثل جميع الأنظمة الصناعية، غالبًا ما تتعرض توربينات الرياح لأعطال تؤدي إلى عطل أو تلف يؤثر على أدائها السليم. في هذه الأطروحة، تقترح هذه الدراسة مخططًا يعتمد على استخدام نهج التعلم الآلي غير الخاضع للإشراف وآلية الكشف عن الانجراف من أجل إجراء تشخيص مبكر للخطأ للمفاتيح البسيطة والمتعددة المفتوحة / المغلقة في المحولات متعددة الخلايا المتعلقة بالتوربين. يتم استخدام عينات البيانات التي تمثل ظروف التشغيل العادية فقط من أجل تكيفها مع الحالة التي لا تتوفر فيها بيانات حول السلوكيات المعيبة. تم إنشاء مؤشر صحي يقيس الاختلاف بين ظروف التشغيل العادية والحالية لاكتشاف الانجراف (التدهور) في المرحلة المبكرة. عندما يتم الكشف عن تدهور (خطأ)، يتم تحقيق العزل من خلال مراعاة الديناميات المنفصلة للمفاتيح. يتم استخراج الميزات المتعلقة بهذا الأخير من أجل بناء مساحة مميزة تسمح بفصل السلوك الخاطئ (المنطقة أو الفئة) للمفاتيح المختلفة. يتم الحصول على النتائج التجريبية باستخدام معيار يمثل العملية الحقيقية لمحول متعدد الخلايا على MATLAB / Simulink ويوافق على كفاءة ومثانة النهج المقترح.

**الكلمات المفتاحية:** توربينات الرياح، تشخيص الأعطال، محولات الطاقة متعددة الخلايا، مراقبة الأخطاء الشبيهة بالانجراف، التنقيب عن البيانات، التعلم الآلي

## Résumé :

Le domaine de la production d'électricité à partir de sources renouvelables est en développement remarquable, et les systèmes éoliens, de leur côté, suivent cette tendance et ont connu un développement révolutionnaire ces dernières années. Comme tous les systèmes industriels, les éoliennes subissent souvent des dysfonctionnements qui entraînent des dysfonctionnements ou des dommages affectant leurs bons fonctionnements. Dans ce travail, un schéma de diagnostic prédictif basé sur une technique d'apprentissage automatique intégrant un mécanisme de détection de dérive est utilisé afin d'effectuer un diagnostic précoce des défauts de blocage des interrupteurs des convertisseurs multicellulaires de la turbine éolienne. Des échantillons de données qui ne représentent que des conditions de fonctionnement normales sont utilisés. Afin de l'adapter à une situation où les données sur les comportements défectueux ne sont pas disponibles. Un indice de santé qui mesure la différence entre les conditions de fonctionnement normales et actuelles a été établie pour détecter la dérive (dégradation) au stade précoce. Lorsqu'une dégradation (défaut) est détectée, l'isolation est obtenue en tenant compte de la dynamique séparée des interrupteurs. Les caractéristiques liées à ces derniers sont extraites afin de construire un espace de caractéristiques qui permet de séparer l'inconduite (région ou classe) des différents commutateurs. Au final une nouvelle structure permettant l'intégration d'une commande tolérante aux défauts est proposée. Les résultats expérimentaux sont obtenus à l'aide d'un standard qui représente le véritable fonctionnement d'un transducteur multicellulaire sur MATLAB / Simulink et est en accord avec l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée.

**Les mots clés :** éolienne, diagnostic de défaut, convertisseurs de puissance multicellulaires, surveillance de défaut de type dérive, exploration de données, apprentissage automatique

## **Summary:**

The field of electricity production using renewable sources is in a remarkable development, and wind energy systems, on their part, follow this trend and have witnessed a revolutionary development in recent years. Like all industrial systems, wind turbines often experience malfunctions that result in malfunction or damage that affects their proper performance. This study proposes a scheme based on the use of unsupervised machine learning approach and a drift detection mechanism in order to perform an early fault diagnosis of simple and multiple stuck-opened/stuck-closed switches in multicellular converters. Only the data samples representing the normal operation conditions are used in order to be adapted to the case where no data is available about faulty behaviors. A health indicator measuring the dissimilarity between normal and current operation conditions is built in order to detect a drift (degradations) in early stage. When a degradation (fault) is detected, the isolation is achieved by taking into account the discrete dynamics of switches. The features related to the latter are extracted in order to build a feature space allowing to separate the faulty behavior (zone or class) of the different switches. Finally, a new structure of power converter able to configure the control algorithm is proposed. The experimental results are obtained using a Benchmark representing the real operation of a multicellular converter on MATLAB /Simulink approves the efficiency and robustness of the proposed approach.

**Keywords:** wind turbines, Fault diagnosis, Multicellular power converters, Drift-like fault monitoring, Data mining, Machine learning

# Sommaire

1.Introduction générale.....	1
1.1.Contexte générale.....	1
1.2.Défis et motivations .....	1
1.3.Approche proposée.....	2
1.4.Organisation de manuscrit.....	2
2.La commande tolérante aux défauts et les convertisseurs de puissance dans l'éolienne.....	3
2.1.Contexte et Définitions des concepts de base.....	3
2.2.Etude bibliographique autour de la commande tolérante aux défauts des convertisseurs de puissance.....	7
2.3.Etude bibliographique autour des convertisseurs de puissance dans l'éolienne.....	11
2.4.Objectif de ce travail.....	16
2.5.Conclusion.....	16
3.Approche proposée pour la commande tolérante aux défauts du convertisseur multicellulaire.....	17
3.1.Introduction.....	17
3.2.Défis et motivations.....	18
3.3.L'Approche proposée.....	18
3.4.Convertisseur DC / AC.....	22
3.5.Structure tolérante aux défauts du Convertisseur DC / AC.....	25
3.6.Expérimentation et résultats obtenu.....	29
3.7.Conclusion.....	40
4.Conclusion générale et perspective.....	41
Bibliographies.....	43

# Liste des Figures

Figure 1	Résumé de la revue de la littérature du taux de défaillance et des temps d'arrêt par turbine par année.....	4
Figure 2	Structure convertisseur puissance.....	7
Figure 3	Familles de convertisseur de puissance.....	8
Figure 4	Principe de commande passive tolérante aux défauts.....	9
Figure 5	Principe de commande active tolérante aux défauts.....	10
Figure 6	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	11
Figure 7	Schéma général d'une éolienne à axe horizontal vue de l'extérieur.....	11
Figure 8	Les composantes de l'intérieur de la nacelle.....	12
Figure 9	système éolienne à base de MADA.....	13
Figure 10	Architecture de convertisseur dans le système d'énergie éolienne.....	14
Figure 11	Architecture du bloc MADA-MCCS.....	14
Figure 12	Répartition des défaillances dans les convertisseurs de puissance.....	15
Figure 13	Systèmes auto-adaptative en ligne propose les étapes pour le diagnostic de panne d'un convertisseur de puissance multicellulaire.....	19
Figure 14	Topologie du convertisseur de P cellules alimentant une charge inductive (R-L).....	23
Figure 15	Topologie du convertisseur utilisée pour la commande tolérante aux défauts.....	26
Figure 16	Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur multicellulaire (fonctionnement normale).....	26
Figure 17	Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur deux niveaux (fonctionnement défaillant).....	27
Figure 18	Tension continue $E$ et tensions des condensateurs flottants $V_{c1}$ , $V_{c2}$ fonctionnement normal.....	27
Figure 19	Tension de sortie du convertisseur multicellulaire.....	27
Figure 20	Tension des condensateurs flottants $V_{c1}$ et $V_{c2}$ lors d'un défaut d'interrupteur.....	28
Figure 21	Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur.....	28
Figure 22	Tension des condensateurs flottants $V_{c1}$ et $V_{c2}$ lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC.....	29
Figure 23	Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC.....	29
Figure 24	Espace de fonction du commutateur de convertisseur de puissance à trois cellules normal et condition de panne dans le cas d'un simple défaut interrupteur bloqué-ouvert.....	32
Figure 25	Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.....	32
Figure 26	Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive.....	32
Figure 27	Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.....	35

Figure 28	Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive.....	<b>35</b>
Figure 29	Espace de fonction du l'interrupteur de convertisseur de puissance à trois cellules, des conditions de fonctionnement normales et de panne dans le cas de Multiples interrupteurs défectueux bloqués-ouverts.....	<b>36</b>
Figure 30	Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.....	<b>38</b>
Figure 31	Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive.....	<b>38</b>
Figure 32	Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.....	<b>39</b>
Figure 33	Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive.....	<b>40</b>

# Liste de Tableaux

Tableau 1	Différents modes de fonctionnement et les niveaux de tension de sortie correspondants du convertisseur à trois cellules.....	24
Tableau 2	Les différents scénarios de défaut discrètes (simples et multiples) pour un convertisseur trois cellules.....	25
Tableau 3	Résultats de la détection des défauts dans l'interrupteur du convertisseur de puissance pour les 12 scénarios.....	33

# Liste D'abréviations

<b>DCCS</b>	<b>Discretly Control Continuous (System</b> (Système continu de contrôle discret)
<b>FTC</b>	<b>Fault Tolerant Control</b> (Contrôle tolérant aux défauts)
<b>FDI</b>	<b>Fault Detection and Isolation</b> (Détection et isolation des défauts)
<b>MCCS</b>	<b>MultiCellular Converter System</b> (Système de convertisseur multicellulaire)
<b>WT</b>	<b>Wind Turbine</b> (Éolienne)
<b>MADA</b>	<b>Machine Asynchrone à Double Alimentation</b> (Machine Asynchrone à Double Alimentation)
<b>AyDyC</b>	<b>Auto-Aadaptative Dynamical Clustring</b> (Auto-Adaptive Clustering dynamique)
<b>RSC</b>	<b>Rotor Side Converter</b> (Convertisseur côté rotor)
<b>GSC</b>	<b>Grid Side Converter</b> (Convertisseur côté réseau)
<b>DFIG</b>	<b>Doubly Fed Induction Generator</b> (générateur à induction à double alimentation)

**CHAPITRE I**  
**INTRODUCTION GENERALE**

## **1. Introduction générale :**

### **1.1.Contexte générale :**

Parmi les sources d'énergies renouvelables disponibles actuellement, l'énergie éolienne présente une très grande croissance dans le monde. Comme le nombre d'éolienne augmente considérablement, et une augmentation légère de l'efficacité d'une éolienne donnera un grand rendement recueilli sur l'ensemble des éoliennes plantées dans un parc éolien et permettra d'augmenter la durée de vie de l'éolienne. L'objectif de ce mémoire de projet de fin d'étude est de développer une stratégie de contrôle tolérante aux défauts de convertisseur de puissance de la turbine éolienne. Les convertisseurs de puissance sont essentiellement composés de condensateurs et interrupteurs. Un défaut dans les composants de convertisseurs menace la stabilité et la sécurité du système. Pour remédier à ces défauts, le développement d'une stratégie de commande aux défauts au niveau de l'algorithme de contrôle ou au niveau de la structure du système est primordial, ça permet d'éviter l'arrêt de la production, conserver la stabilité du système et optimiser ses performances [1].

### **1.2.Défis et motivations :**

La mise en place d'une commande tolérante au défaut, nécessite l'exécution de certaines actions au préalable telle que la détection, la localisation et l'identification de l'amplitude de défauts ce qu'on appelle le diagnostic de défaut. Afin d'éviter des catastrophes inhérentes à l'émergence d'anomalies, un algorithme de diagnostic de défaut associé à une stratégie de commande tolérante aux défauts sont devenus une préoccupation majeure dans la conception, le développement, la validation, la certification et l'exploitation de systèmes. Le diagnostic de défaut dans un stade précoce ainsi la reconfiguration de l'algorithme de commande procurant une tolérance aux défauts qui permet de réduire l'impact de l'anomalie, et mieux gérer la mission dédiée au système et assurer la sécurité (de l'être humain et du matériel, l'environnement) [2]. Afin de réaliser ces objectifs, plusieurs challenges sont liés à la nature du système, de part sa complexité et la non stationnarité de son environnement, la réalisation d'une commande tolérante au défaut performante passe avant tout par un diagnostic de défaut précis, les performances d'un algorithme de diagnostic dépend fortement des données qu'on dispose sur le système, pour un convertisseur de puissance nous nous disposons que la tension de sortie et celle de condensateur et aucune information liée à l'état des interrupteurs, de plus la qualité des données nécessite un prétraitement vu la non stationnarité d'un système éolien.

**1.3.Approche proposée :**

Dans ce travail de mémoire de projet de fin d'étude, une approche basée sur les données intégrant un mécanisme de détection de dérive est développée pour construire un classificateur capable de réaliser une surveillance proactive de la dérive et un diagnostic précoce des défauts pouvant affecter les convertisseurs du système éolien. Cette approche considère la dynamique continue du convertisseur et la décrit par des classes qui représentent le fonctionnement normal dans un espace de représentation sensible au fonctionnement normales du convertisseur de puissance. La dégradation du convertisseur est considérée comme une dérive des caractéristiques des classes normales dans l'espace de représentation. Cette dérive est caractérisée par un changement des caractéristiques des données. L'approche proposée suit ce changement en utilisant un indicateur de dérive. Lorsque la dérive est détectée par un indicateur, une alarme est émise afin d'informer les opérateurs humains de la nécessité de réagir en prenant les mesures de correction adéquates [3].

**1.4.Organisation de manuscrit :**

Ce manuscrit est organisé en deux parties. La première consiste à présenter un état de l'art sur la commande tolérant au défaut en général, ensuite une étude bibliographique autour de l'utilisation des convertisseurs de puissance dans les systèmes éoliens. Dans la deuxième partie, nous décrivons l'approche utilisée pour réaliser le diagnostic précoce des défauts interrupteurs du convertisseur multicellulaire ainsi la stratégie de la commande tolérante au défaut mise en place. Finalement une conclusion et des perspectives sont présentées.

## **CHAPITRE II**

# **La commande tolérante aux défauts et les convertisseurs de puissance dans l'éolienne**

## **2. La commande tolérante aux défauts et les convertisseurs de puissance dans l'éolienne**

### **2.1. Contexte et Définitions des concepts de base :**

Les systèmes éoliens sont typiquement des applications pour lesquelles la production d'énergie électrique est directement liée aux bénéfices économiques qui en découlent. De nombreuses topologies de convertisseurs statique triphasés, reliant les systèmes éoliens au réseau, ont été étudiées dans la littérature [4][5]. Sécurité, fiabilité, performance, qualité et continuité de service sont quelques-unes des préoccupations majeures lors de leur fonctionnement. Les défauts qui peuvent survenir, qu'ils proviennent de la commande rapprochée des convertisseurs (drivers, par exemple) ou du composant de puissance lui-même (de type IGBT par exemple), conduisent à la perte de contrôle totale ou partielle du courant de phase [6][7].

Sur la base de ces statistiques (Figure 1), nous pouvons constater que les convertisseurs échouent le plus fréquemment à accomplir correctement leurs missions. Ces défaillances se traduisent par le deuxième rang des temps d'arrêt par turbine, par an après la boîte de vitesses. Ainsi, l'apparition du défaut conduit à un dysfonctionnement du système éolien et ça pourrait l'obliger à se déconnecter du réseau, en attendant une future opération de maintenance. De plus, si le défaut n'est pas détecté et compensé rapidement, il peut entraîner la destruction des convertisseurs. Afin de réduire ces risques, une méthode de détection et de compensation de défauts est présentée et analysée dans ce travail. L'objectif est de garantir la continuité de service et donc une production continue d'énergie électrique.

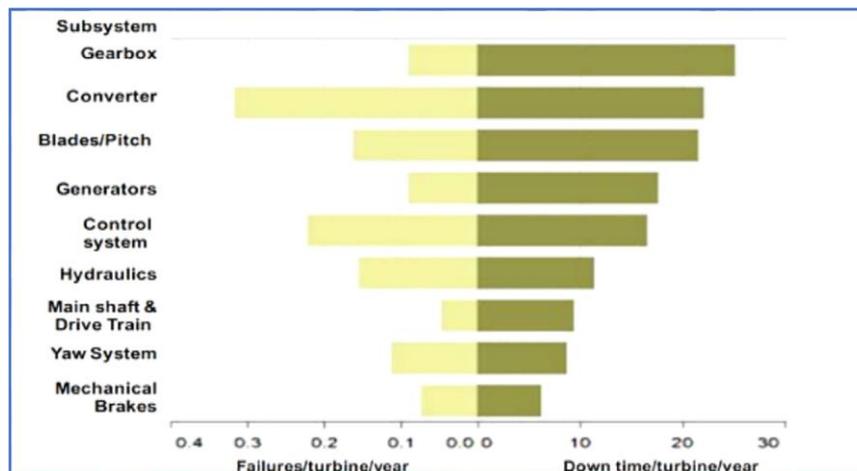


Figure 1 : Résumé de la revue de la littérature du taux de défaillance et des temps d'arrêt par turbine par année.

➤ **Définitions des concepts de base :**

**1. Perturbation, anomalie, défaut, défaillance, panne, résidu, seuil :**

**Perturbation** : signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale [8].

**Anomalie** : particularité non conforme à la loi naturelle ou à la logique [9].

**Défaut** : déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système par rapport aux conditions normales de fonctionnement [8].

**Panne ou défaillance** : interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées [8].

**Résidu** : signaux portants de l'information, basés sur l'écart entre les mesures et les calculs basés sur le modèle.

**Seuil** : valeur limite de l'écart d'un résidu avec le zéro, ainsi s'il est dépassé, un défaut est déclaré comme détecté.

**2. Diagnostic, détection, localisation, identification, La tolérance aux défauts :**

**Diagnostic** : détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut, il suit la détection de défauts et inclut l'isolation et l'identification.

**Détection** : détermination de la présence de défauts et de l'instant de leurs occurrences [8].

**Localisation** : détermination de la classe à laquelle appartient le défaut [10].

**Identification** : quelles sont les caractéristiques de chacun des défauts C'est une fonction qui Suit la localisation.

**La tolérance aux défauts** : a pour but de permettre à un système de remplir sa fonction en dépit des défauts. La tolérance aux défauts concerne les perturbations dues à l'environnement, aux défauts de conception, d'interaction et aux malveillances [11].

### 3. Surveillance, supervision, reconfiguration :

**Surveillance** : consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières [12].

**Supervision** : représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances[8][12] .

**Reconfiguration** : changement de la structure et des paramètres du contrôleur [13].

### 4. Espace de représentation, Indicateur de dérive, Indicateur de direction de dérive :

- **L'espace de représentation :**

L'espace de représentation est basé essentiellement sur les paramètres qui le composent. Il est donc préférable de sélectionner des paramètres sensibles au fonctionnement du système à diagnostiquer, parfois l'espace de représentation est formé de résidus qui regroupent plusieurs paramètres à la fois. Les données issues de du capteur d'un système sont transformées en formes, c'est-à-dire en point, dans l'espace de représentation. Les groupe de forme similaire sont appelé classe. Si les paramètres sont bien déterminés, les classes sont bien discriminées et elles sont situées dans différents régions de l'espace de représentation. Chaque classe associe un mode de fonctionnement (normal ou défaillant). Ces formes, avec leur assignement à une classe, constituent l'ensemble d'apprentissage. Elles sont représentées par  $\mathbf{d}$  caractéristiques, ou attributs, ce qui permet de les voir en tant que vecteur de  $\mathbf{d}$  dimensions, c'est à dire des points, dans l'espace de représentation [14].

- **Indicateur de dérive :**

L'indicateur de dérive vise à mesurer la dissimilarité entre la classe normale  $\mathbf{C}_n$  et la classe évolutive  $\mathbf{C}_e$ . Cette dissemblance est représentée par la distance entre les centres de gravité  $\mu_n$  et  $\mu_e$  des classes  $\mathbf{C}_n$  normales et  $\mathbf{C}_e$  évolutives. Le centre de gravité  $\mu_e$  est mis à jour en ligne après la réception de chaque nouveau point d'arrivée  $\mathbf{X}_{new}$ . Ensuite, l'indicateur de dérive  $I_E(\mathbf{X}_{new})$  est calculé afin de prendre compte de ce nouveau point d'arrivée  $\mathbf{X}_{new}$ .

$I_E(\mathbf{X}_{new})$  est calculé comme la distance entre :

$$d_E(\mu_n, \mu_e) = \sqrt{(\mu_n, \mathbf{x} - \mu_e, \mathbf{x})^2 + (\mu_n, \mathbf{y} - \mu_e, \mathbf{y})^2}$$

Où  $d_E$  est la distance euclidienne. Les coordonnées  $(\mu_n, \mathbf{x}, \mu_n, \mathbf{y})$  et  $(\mu_e, \mathbf{x}, \mu_e, \mathbf{y})$  sont la projection de  $\mu_n$  et  $\mu_e$  respectivement dans les coordonnées du système.

L'indicateur  $I_E(\mathbf{X}_{new})$  garde toujours la plus grande distance sur temps. Par conséquent,  $I_E(\mathbf{X}_{new})$  sera calculé comme suit[15] :

$$I_E(\mathbf{X}_{new}) = \begin{cases} d_E(\mathbf{X}_{new}) & \text{Si } d_E(\mathbf{X}_{new}) > d_E(\mathbf{X}_{t-1}) \\ \text{par ailleurs } d_E(\mathbf{X}_{t-1}) & \end{cases}$$

- **Indicateur de direction de dérive :**

La direction de la classe en évolution dans l'espace des caractéristiques dépend du scénario de panne qui s'est produit. Par conséquent, pour l'isolement des défauts de commutation, nous utilisons un indicateur de direction des défauts afin de surveiller la direction de la classe en évolution. Cela permet de déterminer quel scénario de panne se produit. Par conséquent, la source de dérive anormale peut être isolée [15]. Lorsqu'une dérive (panne) se produit, la classe évolutive migre de la région qui représente les conditions de fonctionnement normales vers la région qui représente la défaillance. Ensuite, un indicateur de direction  $D_r$  est utilisé pour isoler le composant responsable qui a provoqué le défaut. L'idée est de considérer  $\mu_n$ , comme l'origine d'une nouvelle coordonnée de système.

Un angle  $\theta$  est calculé le vecteur reliant le centre de la classe normale  $\mu_n$ , et le centre de la classe évolutive  $\mu_e$ , dans le nouveau système de coordonnées.

L'angle définit la direction de mouvement de la classe en évolution et est calculé comme suit :

$$D_r(\mathbf{X}_{new}) = \arctan(\theta) = \frac{\mu_n, \mathbf{y}' - \mu_e, \mathbf{y}'}{\mu_n, \mathbf{x}' - \mu_e, \mathbf{x}'}$$

Où  $(\mu_n, \mathbf{x}', \mu_n, \mathbf{y}')$  et  $(\mu_e, \mathbf{x}', \mu_e, \mathbf{y}')$  sont la projection de  $\mu_n$  et  $\mu_e$  respectivement dans le nouveau système de coordonnées.

## 2.2. Etude bibliographique autour de la commande tolérante aux défauts des convertisseurs de puissance :

### 1. Le convertisseur de puissance :

Le convertisseur de puissance est un dispositif composé d'interrupteurs commandés électroniquement. Ceux-ci commutent, c'est à dire qu'ils oscillent entre un état passant et un état bloqué [16].

La fréquence de ces commutations est en général assez élevée, de l'ordre de quelques kilo-Hertz, voire quelques dizaines de kilo-Hertz.

Un tel convertisseur est communément appelé convertisseur statique car il ne comprend aucun organe mécanique mobile.

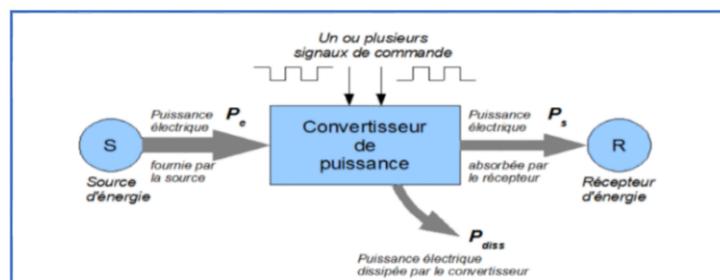


Figure 2 : Structure convertisseur puissance.

Nous allons à présent nous intéresser au transfert d'énergie de la source vers le récepteur, par l'intermédiaire du convertisseur statique (figure 2). Nous considérons ce dernier comme un système fermé qui échange de l'énergie avec son environnement.

Les convertisseurs statiques servent à mettre en forme une onde électrique. Ils permettent par exemple de modifier la forme d'onde d'une tension ou d'un courant, afin d'adapter celle-ci aux besoins du récepteur[17].

### On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (figure 3)

- Redresseur : conversion (alternatif - continu) ;
- Hacheur : conversion (continu - continu) ;
- Onduleur : conversion (continu - alternatif) ;
- Gradateur : conversion (alternatif - alternatif).

Les fonctions de base peuvent être utilisées seules ou associées entre-elles pour adapter les modes de conversion aux besoins de l'utilisateur.

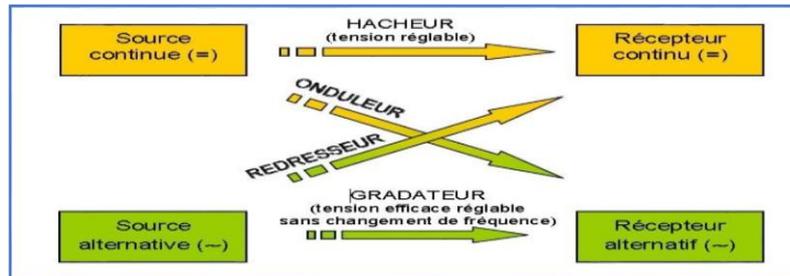


Figure 3 : Familles de convertisseur de puissance.

### 2. Diagnostic du convertisseur de puissance :

Ces défauts (Vieillessement des condensateurs, Blocage d'un interrupteur d'une cellule) peuvent influencer les différentes variables d'états simultanément. Par exemple, le vieillissement des capacités va perturber les dynamiques des tensions internes et un blocage au niveau d'une cellule de commutations va influencer non seulement l'état discret mais également les tensions internes, étant donné que certains modes de fonctionnement seront inaccessibles. Il est donc nécessaire de construire une approche de diagnostic capable de détecter et d'isoler des défauts sur les dynamiques continues et sur l'état discret du convertisseur.

Cependant, avec les méthodes existantes, un observateur classique ne peut pas être utilisé pour détecter et isoler un défaut car seulement la tension de sortie ne permet pas de remonter à l'élément responsable de la dégradation.

Dans la pratique, la plupart des systèmes sont non linéaires et la modélisation est une tâche difficile voire impossible. Alors pour les applications industrielles, les méthodes qui sont applicables pour ce genre de systèmes sont les méthodes sans modèle, nommée aussi méthodes à base de données historiques.

Le diagnostic sans modèle se compose essentiellement de deux types :

- Diagnostic avec des tests statistiques du traitement du signal ;
- Diagnostic par intelligence artificielle.

### 3. La commande tolérante aux défauts :

Des nouvelles lois de commande ont été développées dans un but précis de maintenir les performances du système ainsi que sa stabilité, lors d'un mauvais fonctionnement du système [18]. Dans le domaine industriel ou en aéronautique, le type des problèmes a été souvent évité en se fondant sur de la redondance matérielle à base d'actionneurs et de capteurs. Cette stratégie est non seulement onéreuse mais elle requiert aussi un important dispositif de maintenance. La tâche principale qui incombe à la commande tolérante aux défauts est de synthétiser des lois de commande avec une structure permettant de garantir la stabilité et les performances du système, non seulement lorsque tous les composants de la commande sont opérationnels, mais aussi lorsque des capteurs ou des actionneurs sont défectueux.

### 4. Classification des méthodes de la commande tolérante au défaut :

#### I. Approche passive :

Dans l'approche passive, les techniques de contrôle robuste sont utilisées de manière à ce que le Système en boucle fermée reste insensible à un ensemble connu de défauts avec des régulateurs constants et sans utilisation d'information en ligne des défauts sur le système [19]. Les défauts sont alors pris en compte dans la conception du système de commande. La méthode est basée sur l'idée simple que les défauts représentent des perturbations que la loi de commande doit prendre en considération dès sa conception initiale. Elle utilise les techniques de commande robuste par rapport aux incertitudes paramétriques et perturbations extérieures (commande H1, commande à mode glissant ...). Pour une vue globale des méthodes des commandes robustes, Ce type d'approche n'a besoin ni d'un module de diagnostic pour détecter la présence des défauts ni d'un bloc de reconfiguration de la loi de commande et/ou des paramètres du système, comme la figure suivante : (figure 4)

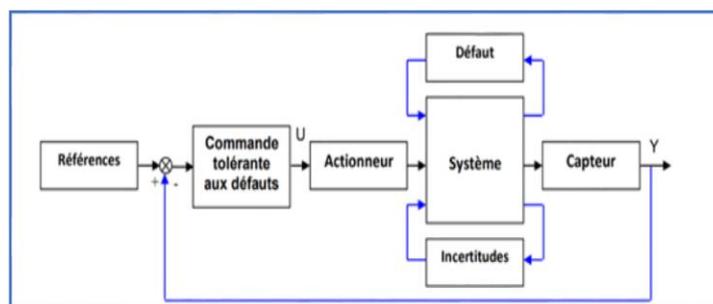


Figure 4 : Principe de commande passive tolérante aux défauts.

## II. Approche active :

A la différence de l'approche passive, l'approche active réagit "activement" sur les défauts en reconfigurant en ligne la loi de commande de manière à maintenir la stabilité et les performances nominales du système [20]. Cette approche permet alors de traiter des défauts imprévus mais nécessite une méthode efficace de détection et d'isolation des défauts permettant de fournir de manière aussi précise que possible une information sur les défauts éventuels (l'instant d'apparition, le type et l'amplitude du défaut). L'architecture générale d'une commande FTC active est décrite dans la (figure 5). Les deux Blocs FDI et FTC, constituent les deux étapes importantes de la commande [21].

Le bloc "FDI" utilise l'entrée et les sorties mesurées du convertisseur. Sa fonction principale est de détecter et d'estimer le défaut ainsi que les variables d'état du système en ligne. Une fois que le défaut est apparu, le bloc "FDI" fournit en ligne les informations concernant le défaut et l'état du système au bloc "FTC".

Ce schéma de FDI doit permettre de prendre en compte les différents types de défauts intervenant sur le système et d'assurer la fiabilité de ses informations pour activer le mécanisme de reconfiguration en un temps minimal. Le bloc "FTC" se base sur les informations délivrées par le bloc "FDI". En fonction du mécanisme utilisé et du type du défaut survenu, il accommode ou reconfigure en ligne la loi de commande afin de maintenir la stabilité, la dynamique du système ainsi que ses performances initiales [20].

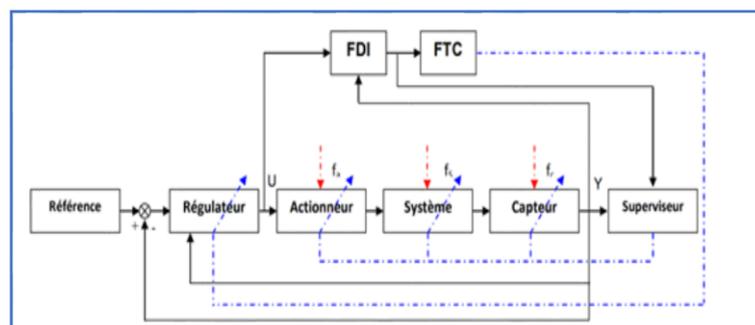


Figure 5 : Principe de commande active tolérante aux défauts.

## 2.3. Etude bibliographique autour des convertisseurs de puissance dans l'éolienne :

### 1. Définition d'une éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. (Figure 6) [22].

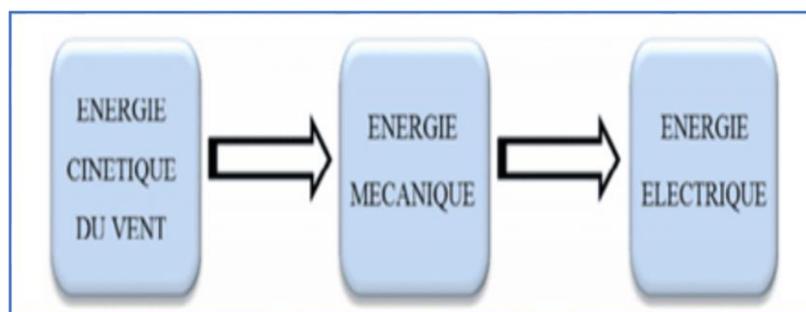


Figure 6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

### 2. Description de la turbine éolienne :

On peut voir (figure 7) que la nacelle est montée au sommet de la tour. A l'intérieur de la nacelle, se trouve les équipements de contrôle et de conversion d'énergie, à partir du système de rotation mécanique en énergie électrique. Les pâles sont fixées à l'axe principal du moyeu. Un anémomètre est souvent placé sur le sommet de la nacelle pour mesurer la vitesse et donner la direction du vent. La figure 8 présente l'intérieur de la nacelle, qui montre l'axe principal connecté au générateur (à la génératrice) par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse (gear box). La génératrice est connectée au réseau à travers les convertisseurs d'électronique de puissance et un transformateur à haute tension.

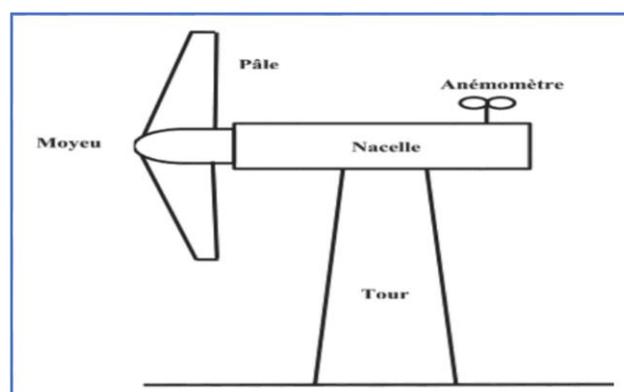


Figure 7 : Schéma général d'une éolienne à axe horizontal vue de l'extérieur.

Le fonctionnement général de la turbine éolienne commence par la pression exercée par le vent sur les pâles du système éolien, forçant le rotor de l'éolienne à tourner. Ainsi, l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique à travers la rotation de l'arbre de l'éolienne. L'énergie générée dépend principalement de la vitesse du vent et de la surface du disque rotorique (donc du diamètre du rotor), et des paramètres hydrodynamiques.

Entre le générateur et le rotor, un multiplicateur de vitesse est utilisé pour augmenter la vitesse rotationnelle du générateur à partir de la vitesse du rotor. Les convertisseurs d'électronique de puissance peuvent être utilisés pour régler le couple du générateur, par conséquent ils peuvent être utilisés pour le contrôle de la vitesse rotationnelle de la génératrice aussi bien que la vitesse du rotor. Ce couple représente une deuxième variable de contrôle de l'énergie de l'éolienne. Le fonctionnement de la turbine éolienne est bien décrit dans la littérature, notamment dans [23][24][25].

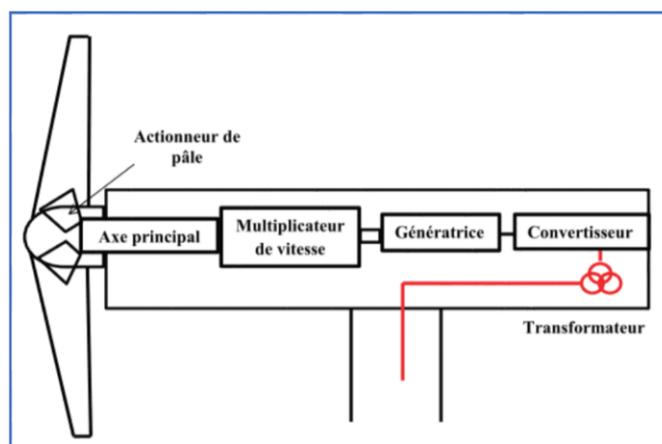


Figure 8 : Les composantes de l'intérieur de la nacelle.

### 3. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans un système éolien :

Les générateurs les plus populaires dans les systèmes éoliens sont les générateurs asynchrones à double alimentation (MADA) grâce à leurs avantages offerts par ces machines électriques, le fonctionnement à vitesse variable augmente la capacité de production de la machine de 5 à 15 %. Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Comme la machine asynchrone, elle se compose d'un stator qui est fixe, et d'un rotor qui est mobile. Le stator est alimenté par une tension triphasée. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine [26].

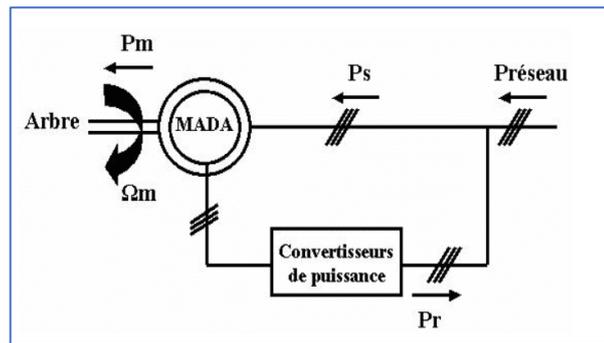


Figure 9 : Système éolienne à base de MADA.

Grâce aux convertisseurs de puissance bidirectionnels, dans le circuit du rotor, la MADA est capable de travailler en tant que génératrice ou moteur de façon hypersynchrone ou hypo synchrone.

On utilise le schéma de la MADA en convention moteur hypo synchrone car c'est la convention habituelle (figure 9).

**P<sub>m</sub>** : Puissance mécanique (**P<sub>m</sub> < 0** si la machine est entraînée)

**P<sub>s</sub>** : Puissance active absorbée par le stator (**P<sub>s</sub> < 0** si la MADA est génératrice)

**P<sub>r</sub>** : Puissance active débitée par le rotor (son sens dépend du signe du glissement)

**P réseau** : Puissance active fournie par le réseau à la machine

(**P réseau < 0** si la MADA est génératrice)

**Ω<sub>m</sub>** : Vitesse de rotation de la MADA

#### 4. Description du système éolien à base de MADA (DFIG) :

La figure 10 représente La structure MADA se compose de deux convertisseurs, l'un est dans le côté réseau (GSC) et l'autre est dans le côté MADA et appelé le convertisseur côté rotor (RSC). Le MADA est mis en œuvre et alimenté par le réseau électrique via le stator tandis que le rotor est connecté au réseau par deux convertisseurs formant une double conversion :

- Courant alternatif (AC) à courant continu (DC) côté réseau (GSC) (redresseur)
- Courant continu (DC) à courant alternatif (AC) côté rotor (RSC) (onduleur)

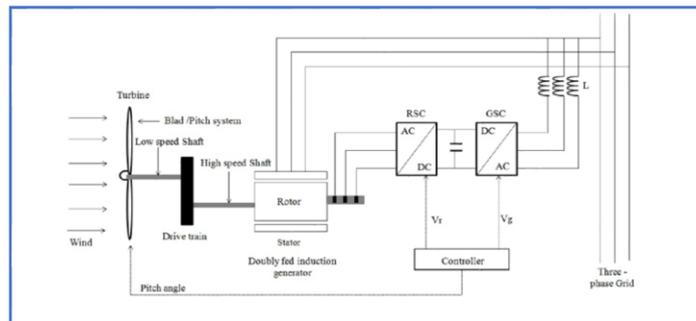


Figure 10 : Architecture de convertisseur dans le système d'énergie éolienne.

Nous étudions le diagnostic de panne des convertisseurs multicellulaires (MCCS) implémentés en RSC.

Il est utilisé dans la conversion DC-AC pour contrôler les courants des trois phases du MADA avec un suivi de point de puissance maximale (MPPT).

Dans la turbine éolienne, les convertisseurs multicellulaires sont utilisés pour contrôler les courants du rotor MADA.

Le RSC se compose de trois convertisseurs identiques à trois cellules mis en œuvre en parallèle et alimentés par la tension de liaison DC voltage  $E$  qui est contrôlée par le convertisseur en GSC (figure 11).

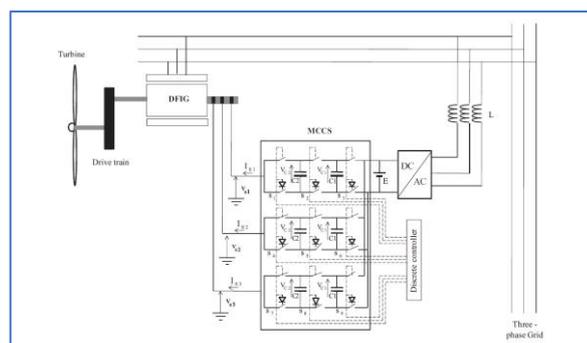


Figure 11 : Architecture du bloc MADA-MCCS.

### 5. L'onduleur de tension :

Assure la conversion de l'énergie continue en alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie, ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques. L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à

partir du réseau standard 220/380V, 50Hz [27] . Par ailleurs, l'onduleur connecté à la machine, est constitué de trois bras formés d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence de travail, chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires munis de diode montée en antiparallèle. Les diodes de roue libres assurent la continuité du courant dans la MADA une fois les interrupteurs sont ouverts. À noter qu'un temps de retard doit exister pratiquement entre les interrupteurs haut et bas d'un même bras afin d'éviter le court-circuit de la source continu [27].

### ✚ Mode de défaillance des éléments de puissance dans un onduleur :

Les types de défauts peuvent apparaître dans les éléments constituant le convertisseur lui-même tels que les composants semi-conducteurs de puissance, les capacités du bus continu, les circuits d'alimentation, etc. La répartition de ces défauts est aussi illustrée par la même (figure 12) nous constatons que les modules de puissances sont considérés comme les composants les plus sensibles aux défauts avec un pourcentage de 34% [28][29],[30]. Tous ces défauts entraînent une détérioration des performances du convertisseur ou même un arrêt imprévu du système d'entraînement. Les défauts des interrupteurs de puissance dans un convertisseur statique font l'objectif de ce travail et peuvent être classés en deux types : défauts de type court-circuit et les défauts de type circuit-ouvert.

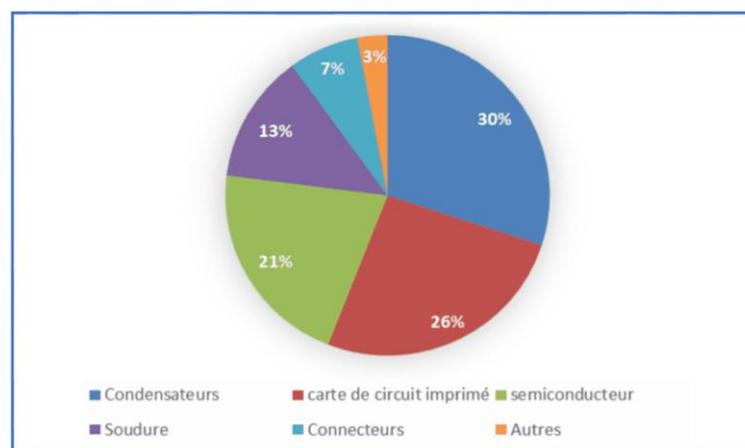


Figure 12 : Répartition des défaillances dans les convertisseurs de puissance.

**✚ Défauts de l'onduleur :**

**1) Défaut d'ouverture :**

Le défaut de l'onduleur qui se produit le plus fréquemment est le défaut de court-circuit d'un interrupteur. Ce type de défaut risque de court-circuiter le bus continu lorsque l'interrupteur complémentaire du même bras de l'onduleur est commandé à la fermeture[31].

**2) Défaut de fermeture :**

Un interrupteur en défaut de circuit-ouvert est un interrupteur toujours à l'état bloqué.

**2.4.Objectif de ce travail :**

L'objectif principal de l'approche proposée est de tirer parti des approches d'apprentissage automatique afin d'améliorer les performances de diagnostic, en utilisant uniquement les données récentes et utiles représentant la dynamique de dégradation des défauts de commutation simples et multiples. Contrairement aux approches proposées dans la littérature, notre approche est capable d'isoler tous les défauts de commutation de convertisseur (simples ou multiples) et de suivre la dérive afin d'identifier leur type (bloqué ouvert ou bloqué fermé). Par conséquent, l'isolement et l'identification des pannes ont une importance cruciale pour déployer une stratégie de contrôle efficace et tolérante aux pannes.

**2.5.Conclusion :**

Le diagnostic des défauts dans les convertisseurs est essentiel afin d'améliorer la disponibilité des éoliennes et de réduire leurs coûts de maintenance et d'exploitation. Peu d'approches ont été proposées dans la littérature pour la réalisation d'un diagnostic précoce des convertisseurs de puissance de l'éolienne. Cela est dû au fait que la modélisation de la dégradation des convertisseurs dans des environnements non stationnaires est une tâche très difficile. Dans le prochain chapitre l'approche proposée afin de répondre aux différents défis recensés dans la littérature sera présentée.

## **CHAPITRE III**

# **Approche proposée pour la commande tolérante aux défauts du convertisseur multicellulaire**

### 3. Approche proposée pour la commande tolérante aux défauts du convertisseur multicellulaire

#### 3.1.Introduction :

Généralement, les approches proposées pour effectuer le diagnostic des défauts des convertisseurs multicellulaires sont basées soit sur un modèle analytique ou basées sur les données. Les approches basées sur un modèle analytique utilisent des connaissances physiques sur le comportement / la dynamique / la structure du système afin de construire un modèle [15][32]. Les connaissances physiques sont souvent indisponibles en raison de la complexité du système ou de ses environnements en évolution. Dans les approches à base de données, le modèle est construit par apprentissage à l'aide d'un ensemble de mesures historiques sur la dynamique du système dans des conditions de fonctionnement normal et de défaut. Les données de mesures sont collectées et traitées afin d'obtenir des caractéristiques discriminantes sensibles à la dynamique du système puis d'apprendre les paramètres du modèle [33][34]. Le principal avantage de ces approches est qu'elles ne nécessitent pas de connaissances physiques sur la dynamique / le comportement / la structure du système et fonctionnent efficacement tout en traitant des problèmes non linéaires et multi-variables. Voici des exemples d'approches utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique pour effectuer le diagnostic des pannes de systèmes complexes : Support Vector Machines (SVM) [35][36]. Modèles graphiques (modèles de Markov cachés, réseaux bayésiens) [37][38], Analyse en composantes principales (ACP) [39][40]. Réseaux de neurones (NN) [41][42]. Fuzzy basé sur des règles Algorithme [43][44] et algorithme génétique [38][45]. Cependant, ces approches souffrent de certaines limites, ils ont besoin de données historiques sur tous les comportements fautifs afin d'apprendre les paramètres de la fonction de décision permettant de reconnaître leurs occurrences. Par exemple, lorsque SVM est utilisé pour le diagnostic de défaut, chaque comportement de défaut est représenté par une zone restreinte, appelée classe, dans l'espace de représentation. SVM apprend une fonction de décision permettant de construire des bordures séparant la classe des comportements de défaut normaux et différents dans l'espace des fonctionnalités. L'occurrence d'un certain défaut est détectée et localisée (reconnue) en classant les conditions de fonctionnement actuelles, représentées par un point dans l'espace des fonctionnalités, dans la classe de défaut correspondante. La construction de ces frontières de décision nécessite des points de données historiques sur chacune de ces classes.

### 3.2. Défis et motivations :

Dans les applications réelles, il est souvent impossible d'obtenir des mesures de données sur chaque défaut potentiel en raison de leur coût ou pour des raisons de sécurité. Par conséquent, l'approche d'apprentissage automatique doit être mise à jour en ligne pour pouvoir intégrer des nouveaux comportements des défauts de l'interrupteur bloqué-fermé se produisant souvent en raison d'une défaillance intrinsèque causée par une surtension ou un dépassement de température. Certains articles ont été publiés pour traiter les défauts d'interrupteur bloqué-fermé dans les convertisseurs de puissance [46][47]. L'interrupteur bloqué-fermé est l'une des défaillances les plus fatales, et son diagnostic précoce de défaut est essentiel pour limiter ses mauvaises conséquences en déclenchant les actions adéquates. Cependant, la plupart des méthodes de détection de défauts des interrupteurs existantes sont basées sur des circuits matériels. Très peu sont basées sur des algorithmes [48]. La plupart des approches de diagnostic de défauts discrets ne diagnostiquent pas les défauts d'interrupteurs simples et multiples au même temps. De plus, peu de travaux ont été proposés pour réaliser un diagnostic précoce des défauts des convertisseurs de puissance multicellulaires en utilisant des approches d'apprentissage automatique. Ces approches souffrent de deux limites principales. Premièrement, ils nécessitent des échantillons de données sur chaque mode de défaillance, ce qui est souvent difficile à obtenir pour des raisons de coût et de sécurité.

Deuxièmement, ils n'utilisent pas de mécanisme de détection de dérive pour détecter l'apparition d'une dégradation à son stade précoce. Cela augmente le délai de diagnostic des défauts et réduit le temps nécessaire pour effectuer les raisons de maintenance d'un système éolien.

### 3.3. L'Approche proposée :

L'approche proposée comprend quatre étapes :

1. **La première étape** vise à construire un classificateur, en apprenant à l'aide d'un ensemble de données caractérisant les conditions normales de fonctionnement pendant une certaine période de temps dans le passé. Le classificateur attribue un nouveau modèle, caractérisant les conditions de fonctionnement actuelles, à la classe normale ou les données sont rejetées se trouve.
2. **La deuxième étape** est l'étape de regroupement. Il vise à rassembler les données rejetées de la classe normale à une classe évolutive. Ces derniers font référence à une dégradation telle un interrupteur bloqué ouvert ou bloqué fermé.
3. **La troisième étape** est l'étape de surveillance. Il vise à observer un changement des propriétés statistiques de données entrantes en fonction de ceux de la classe normale. Ce changement est quantifié grâce à un indicateur de dérive permettant de mesurer la dissimilarité entre les propriétés

statistiques des motifs appartenant à la classe normale et les motifs entrants appartenant à la classe évolutive.

4. **La dernière étape** est l'étape de mise à jour. Il permet de mettre à jour la structure du classifieur en ajoutant l'occurrence d'une classe représentant un mode de défaillance (nouvelle classe anormale) à sa fonction de décision. En effet, lorsque les propriétés statistiques des modèles entrants ne changent plus selon celles de la classe normale, cela indique l'occurrence d'un mode de défaillance (par exemple, 100% bloqué ouvert ou bloqué fermé d'un interrupteur) voir (la Figure 13).

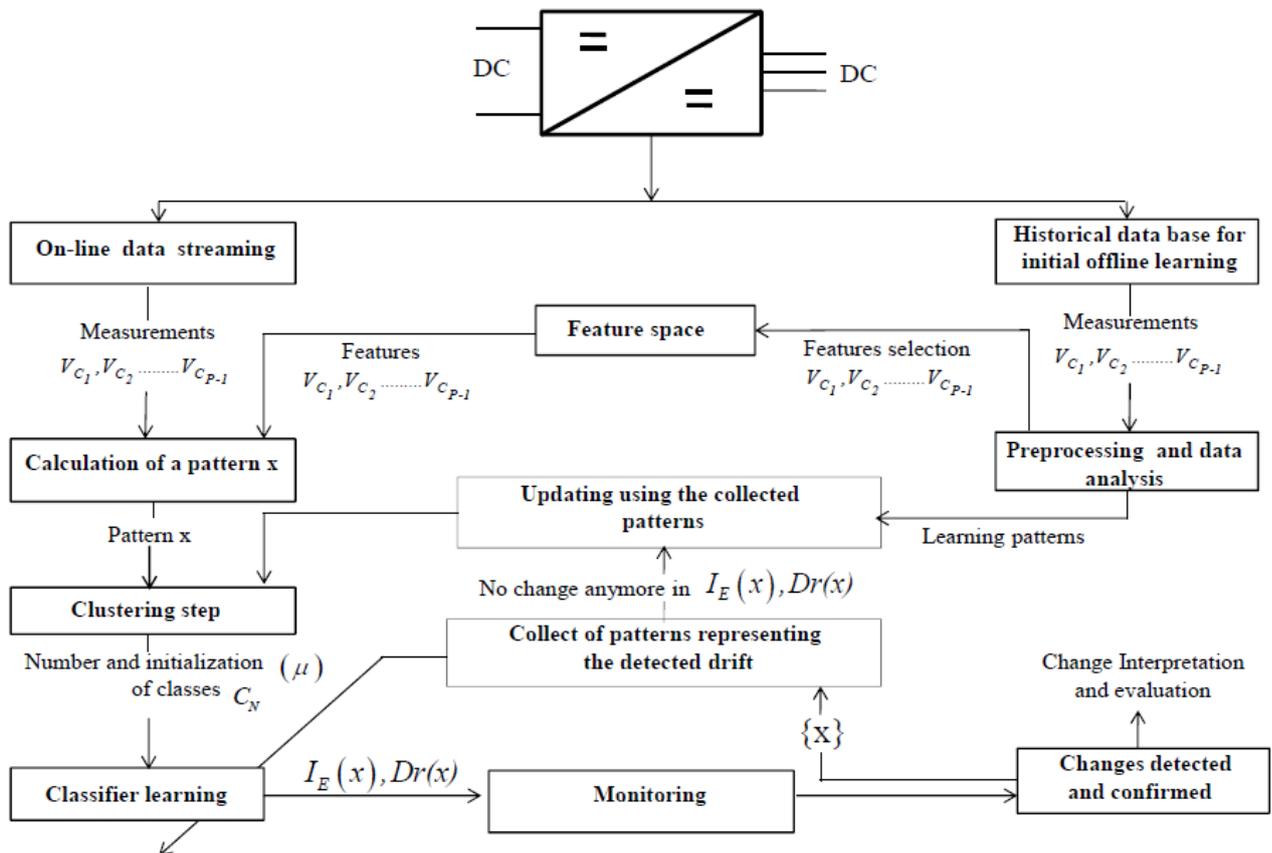


Figure 13 : Systèmes auto-adaptative en ligne propose les étapes pour le diagnostic de panne d'un convertisseur de puissance multicellulaire.

#### ✚ Traitement et analyse des données :

Le but de l'étape d'analyse de traitement et de données consiste à construire un espace de représentation basée sur des caractéristiques capable de distinguer entre les conditions de fonctionnement normal (représentant la classe normale) et chacun des modes de défaillance (par exemple, un commutateur bloqué-ouvert ou bloqué-fermé). À cette fin, les caractéristiques sensibles sont définies en fonction de l'utilisation des techniques et des outils d'analyse de traitement du signal

/ données ainsi que les connaissances physiques disponibles sur la dynamique du système et son comportement. Les caractéristiques sélectionnées doivent permettre de maximiser la séparation entre la classe normale et chacun des modes ou classes de défaillance dans l'espace de représentation. Afin de définir des éléments sensibles permettant de distinguer les classes normales et les modes de défaillance  $y$  associé, dans le convertisseur multicellulaire, la connaissance physique sur la dynamique de celui-ci est utilisée. A cet effet, Les tensions de condensateur sont réglées autour de leurs valeurs de référence, donnée par (l'équation 3), lorsque le convertisseur multicellulaire est dans des conditions de fonctionnement normales. Lorsqu'un défaut de commutation simple ou multiple se produit, le contrôleur ne peut plus réguler les tensions des condensateurs pour se situer autour de leurs valeurs de référence. Ce changement entre les valeurs réelles et référence des tensions de condensateur et son augmentation au fil du temps permettent de détecter une dégradation observée comme une évolution de la classe normale dans l'espace de représentation.

#### **✚ Conception du classificateur et mise à jour de ses paramètres et de sa structure :**

La conception d'un classificateur vise à construire une fonction de décision afin de séparer les différentes classes (c'est-à-dire, représentant les modes de fonctionnement normal et de défaillance) dans l'espace de représentation. Les conditions de fonctionnement actuelles sont représentées par un point dans l'espace de représentation. La fonction de décision du classificateur affecte ce point à l'une de ces classes, ce qui permet de déterminer si le système est en mode de fonctionnement normal ou en panne. Lorsqu'un nouveau mode de défaillance se produit, la fonction de décision du classificateur doit être mise à jour afin d'intégrer ce nouveau mode de défaillance (c'est-à-dire représenté par une nouvelle zone ou classe dans l'espace de représentation). Sans perte de généralité, la méthode de regroupement dynamique auto-adaptatif (AuDyC) [34] est utilisée pour concevoir le classificateur et mettre à jour les paramètres et la structure de sa fonction de décision. La conception et la mise à jour du classifieur sont basées sur les propriétés statistiques (distribution des données dans l'espace caractéristique représenté comme un mélange gaussien) des échantillons de données initiaux formant les classes initiales. Il s'agit d'une méthode de classification non supervisée capable d'apprendre les paramètres des classes initiales (centre de gravité, matrice de variance-covariance) et de les mettre à jour en ligne. Chaque classe est représentée par son centre de gravité  $\mu_{pj} \in \mathbf{R}^d$  et une matrice de variance – covariance  $\Sigma_{pj} \in \mathbf{R}^{d \times d}$  dans un espace d'entités de  $d$  entités. Chaque classe nécessite un nombre minimum de  $N_{win}$  de points définis par les utilisateurs. La mise à jour des paramètres de chaque classe est réalisée en intégrant les nouveaux points entrants et en supprimant les plus anciens via une fenêtre temporelle glissante. Les nouveaux échantillons de données entrants renforcer

l'estimation des paramètres des classes déjà existantes lorsqu'elles ont des propriétés statistiques (moyenne, variance-covariance) très proches de celles de ces classes.

Cependant, lorsque ces propriétés statistiques (moyenne, variance-covariance) entraînent un changement dans les paramètres des classes déjà existantes supérieures à un seuil prédéfini (normalement défini comme trois fois les écarts-types de la distribution des données de classe), elles indiquent un changement (dérive). Dans ce cas, ces points seront attribués à une nouvelle classe  $C_e$  appelée classe évolutive. Seuls les échantillons de données correspondant aux conditions normales de fonctionnement sont considérés comme disponibles à l'avance. Ils forment la classe normale notée  $C_n = (\mu_n, \Sigma_n)$ . Cette hypothèse permet de surmonter le problème des données déséquilibrées où les échantillons de données sur les conditions de fonctionnement normales sont beaucoup plus que ceux représentant les conditions de défaillance. De plus, il permet de compléter en ligne les connaissances manquantes (échantillons de données) sur certains modes de défaillance absents dans l'ensemble de données initiales. Lorsque les propriétés statistiques des échantillons de données entrants dans une fenêtre temporelle glissante sont très proches (moins de trois écarts-types) à ceux de la classe normale, ces échantillons de données ne représentent pas une dérive (dégradation ou évolution vers un mode de défaillance). Lorsque ces propriétés statistiques génèrent un changement plus grand que le seuil prédéfini (trois écarts-types), elles indiquent une dérive (dégradation). Dans ce cas, la classe évolutive créée par l'estimation des paramètres  $C_e = (\mu_e, \Sigma_e)$ . Lorsque les propriétés statistiques des nouveaux échantillons de données entrants ne changent pas (moins de trois écarts-types) selon les fenêtres glissantes précédentes, une classe de défaillance rassemblant ces échantillons de données est créée en estimant ses paramètres (centre de gravité et matrice de variance-covariance).

#### **✚ Surveillance et interprétation des défauts :**

Les données représentant un défaut interrupteur dans un convertisseur multicellulaire évolue progressivement de l'état de fonctionnement normal à un mode de défaut fermé bloqué-ouvert ou bloqué-fermé. L'observation de cette dégradation (évolution ou dérive) permet de détecter ce mode de défaut à un stade précoce. Par conséquent, les opérateurs de surveillance peuvent avoir plus de temps pour effectuer les opérations de maintenance. A cet effet, l'approche proposée dans cette thèse utilise deux indicateurs.

- **Le premier indicateur est un indicateur de dérive** qui mesure la dissimilarité entre les caractéristiques des classes normales et évolutives (centres de gravité) représentées par une distance euclidienne dans l'espace de représentation.

- **Le second est l'indicateur de direction de dérive.** Il est utilisé pour surveiller la direction de la classe en pleine évolution, qui mieux isoler les défauts détectés.

La détermination de l'évolution de la classe en calculant son angle dans l'espace de représentation permet d'éviter la confusion entre les différentes sources de défauts. Étant donné que chaque défaut d'interrupteur a une direction et une trajectoire différentes de sa classe défectueuse dans l'espace de représentation. La détection du défaut et la détermination de sa trajectoire permettent de s'affranchir du problème de chevauchement des classes de défauts d'interrupteur et de mieux isoler les sources de défaut à un stade précoce. L'étape d'interprétation vise à comprendre les changements détectés dans les paramètres et les structures des classes. Il peut ensuite être utilisé comme une prévision à court terme de la tendance de la situation actuelle à l'avenir. Afin d'éviter les fausses alarmes, une dérive est détectée et confirmée lorsque l'indicateur IE devient supérieur à un seuil égal à trois écarts-types de la distribution des points dans la classe normale. Ce seuil permet d'obtenir un compromis entre les fausses alarmes et les alarmes manquées notamment lorsque la dérive est lente. Lorsque l'indicateur de dérive ne change plus (c'est-à-dire qu'il reste moins de trois écarts-types), cela indique que le mode de défaillance (fin de la dérive ou dégradation).

### **3.4. Convertisseur DC / AC :**

La configuration **DC-AC** d'un convertisseur de puissance multicellulaire (onduleur multiniveaux) associé à une charge inductive (**R-L**) est illustrée. Cette topologie offre une répartition équilibrée de la tension d'entrée **E** entre **p** cellules de commutation au moyen de **p - 1** condensateurs flottants.

Chaque cellule contient des commutateurs de remorquage avec des valeurs complémentaires. Si l'un est fermé, l'autre est ouvert et vice versa. Ces commutateurs peuvent être commandés par le signal de commande **S<sub>j</sub>** (voir figure 14).

**S<sub>j</sub>** est égal à **1** lorsque l'interrupteur supérieur de la cellule est conducteur et à **0** lorsque l'interrupteur complémentaire inférieur de la cellule est conducteur [49].

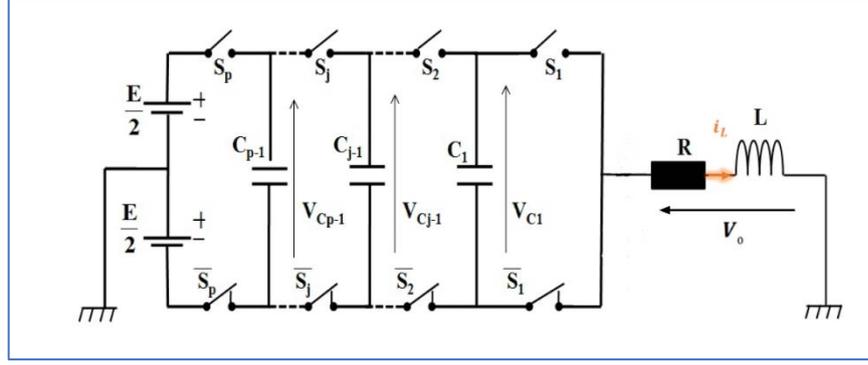


Figure 14 : Topologie du convertisseur de P cellules alimentant une charge inductive (R-L).

La cellule de commutation est composée de paires d'interrupteur complémentaires et commandée par un signal d'entrée binaire ( $S_j \in \{0, 1\}, j \in \{1, \dots, p\}$ ). Pour le j<sup>ème</sup> cellule, le signal d'entrée  $S_j = 1$  (respectivement  $S_j = 0$ ) indique que l'interrupteur supérieur est activé (respectivement désactivé) et l'interrupteur inférieur est désactivé (respectivement activé). En considérant la tension  $V_{Cj}$  aux bornes de chaque condensateur  $C_j$  et le courant d'inductance  $I_L$  comme variables d'états continus (figure 14), la dynamique d'un convertisseur à cellules  $P$  peut être décrite par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dV_{Cj}}{dt} = \frac{1}{C_j} (S_{j+1} - S_j) i_L, j = 1, \dots, p-1 \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_o - R i_L) \end{cases} \quad (1)$$

Où  $V_o$  est la tension de sortie du convertisseur définie comme suit :

$$V_o = \sum_{j=1}^{p-1} V_{Cj} (S_{j+1} - S_j), \text{ Si } S_{p+1} = -\frac{E}{2} \text{ et } V_{Cp} = \frac{E}{2} \quad (2)$$

Selon les états des cellules, on peut distinguer des configurations  $2p$ , appelées modes de fonctionnement [50]. Soit  $q_i$  ( $i \in \{1, \dots, 2p\}$ ) le i<sup>ème</sup> mode de fonctionnement obtenu par une combinaison spécifique d'états de cellule (voir le tableau 1 pour le cas du convertisseur à trois cellules).

### CHAPITRE III Approche proposée pour la commande tolérante aux défauts du convertisseur multicellulaire

Tableau 1 : Différents modes de fonctionnement et les niveaux de tension de sortie correspondants du convertisseur à trois cellules.

Modes de fonctionnement	Les variables	$q_1$		$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$
<b>États des cellules</b>	$S_1$	0		1	0	1	0	1	0	1
	$S_2$	0		0	1	1	0	0	1	1
	$S_3$	0		0	0	0	1	1	1	1
<b>L'évolution de l'Etat</b>	$V_{c1}$	→		↘	↗	→	→	↘	↗	→
	$V_{c2}$	→		→	↘	↘	↗	↗	→	→
	$i_L$	↘		↗↘	↗↘	↗↘	↗↘	↗↘	↗↘	↗
<b>La tension de sortie (équilibre)</b>	$V_0$	$-\frac{E}{2}$		$-\frac{E}{6}$	$-\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$-\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{2}$

Pour la sécurité du convertisseur, qui correspond à une répartition équilibrée de la tension d'entrée  $E$  entre les  $p$  cellules de commutation, les tensions des condensateurs doivent être régulées autour des références moyennes suivantes :

$$V_{c_j,ref} = j \frac{E}{p}, \quad j \in \{1, \dots, p-1\} \quad (3)$$

La tension de sortie a  $p + 1$  niveaux  $(-\frac{E}{2}, \frac{E}{p}, \frac{2E}{p}, \dots, \frac{E}{2})$

Cela permet d'obtenir une amélioration remarquable des formes d'onde de sortie (ondulations faibles et fréquence apparente élevée), conduisant à une réduction significative des éléments filtrants [51]. Le schéma de contrôle suit la procédure donnée dans [52]. Il offre des fonctionnalités intéressantes telles que : une bonne régulation du courant de charge et des tensions des condensateurs, la robustesse malgré les variations d'entrée et de charge et la robustesse vis-à-vis des différents paramètres du modèle. Cependant, ces propriétés sont perdues en cas de mauvais fonctionnement du convertisseur, ce qui correspond à une ou plusieurs cellules de commutation endommagées.

Par conséquent, le fonctionnement défectueux doit être détecté et isolé le plus rapidement possible afin de développer un contrôleur tolérant aux pannes et d'éviter que le convertisseur ne soit endommagé.

La section suivante étudie un schéma d'apprentissage auto-adaptatif pour le diagnostic des défauts d'un convertisseur de puissance multicellulaire sous les défauts discrets suivants :

- **Défaut interrupteur simple** : représente le cas défectueux où un seul interrupteur est bloqué fermé ou bloqué ouvert.
- **Défauts interrupteurs multiple** : représente le cas où plusieurs interrupteurs sont défectueux.

Tableau 2 : Les différents scénarios de défaut discrètes (simples et multiples) pour un convertisseur trois cellules.

<i>Type</i>	<i>Défaut <math>F_i</math></i>	<i>interrupteur</i>
<i>Défaut simple Bloqué ouvert</i>	$F_1$	$S_1$
	$F_2$	$S_2$
	$F_3$	$S_3$
<i>Défaut simple Bloqué fermé</i>	$F_4$	$S_1$
	$F_5$	$S_2$
	$F_6$	$S_3$
<i>Défauts multiples Bloqué ouvert</i>	$F_7$	$S_1$ et $S_2$
	$F_8$	$S_1$ et $S_3$
	$F_9$	$S_2$ et $S_3$
<i>Défauts multiples Bloqué fermé</i>	$F_{10}$	$S_1$ et $S_2$
	$F_{11}$	$S_1$ et $S_3$
	$F_{12}$	$S_2$ et $S_3$

### 3.5. Structure tolérante aux défauts du Convertisseur DC / AC :

Le convertisseur utilisé pour la commande tolérante aux défauts est composé d'un convertisseur multicellulaire à trois cellules et quatre niveaux en parallèle avec un convertisseur deux niveaux. La figure 15 représente le schéma unifilaire de topologie de ce convertisseur avec les interrupteurs  $S_{n1}$ ,  $S_{n2}$  sont fermés (état passante) et  $S_{d1}$ ,  $S_{d2}$  sont ouverts (état bloquée) lorsque le fonctionnement normal du convertisseur multicellulaire. S'il y a un défaut des interrupteurs ou des condensateurs flottants du convertisseur multicellulaire, les interrupteurs  $S_{n1}$ ,  $S_{n2}$  sont ouverts (état bloquée) et  $S_{d1}$ ,  $S_{d2}$  sont fermés (état passantes).

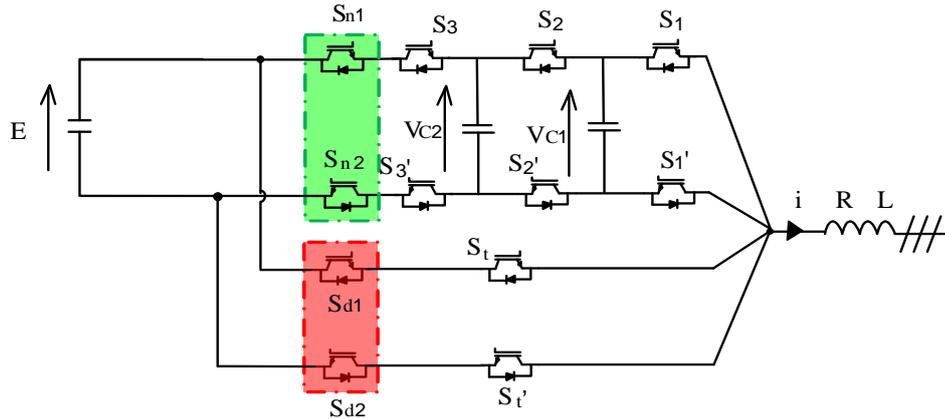


Figure 15 : Topologie du convertisseur utilisée pour la commande tolérante aux défauts.

### 3.5.1. Loi de commande en fonctionnement normal (convertisseur multicellulaire)

En fonctionnement normal le convertisseur proposé est fonctionne comme convertisseur multicellulaire à trois cellules. La commande utilisée est la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Pour générer ces commandes, on compare un signal sinusoïdal de référence avec un signal triangulaire (porteuse) de fréquence supérieur à la fréquence de référence, la deuxième porteuse est décalée de  $T/3$  par rapport la première ou  $T$  est la période de découpage, la troisième porteuse est décalée de  $2*T/3$  par rapport la première, la figure suivante :

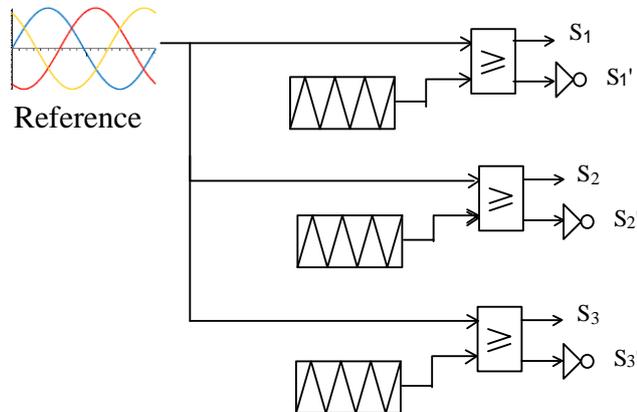


Figure 16 : Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur multicellulaire (fonctionnement normal).

### 3.5.2. Loi de commande en fonctionnement avec défauts (convertisseur classique deux-niveau)

En fonctionnement défaillant le convertisseur proposé est fonctionne comme convertisseur classique à deux niveaux. La commande utilisée est la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Pour générer ces commandes, on compare un signal sinusoïdal de référence avec

un signal triangulaire (porteuse) de fréquence supérieur à la fréquence de référence, la figure suivante :

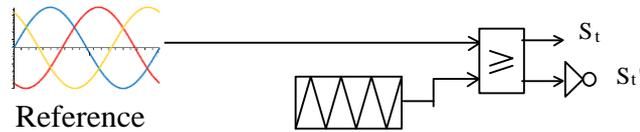


Figure 17 : Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur deux niveaux (fonctionnement défaillant).

La figure 17 montre la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) en boucle ouverte pour commander le convertisseur multicellulaire (fonctionnement normal) et le convertisseur deux niveaux (fonctionnement avec défaut).

La figure 18 montre la tension continue et les tensions des condensateurs flottants du convertisseur multicellulaire dans le fonctionnement normal, les tensions  $V_{c1}$  et  $V_{c2}$  tendent vers ces valeurs de références après un régime transitoire de 0.05 S. figure 18 représente la tension de la sortie de quatre niveaux du convertisseur multicellulaire.

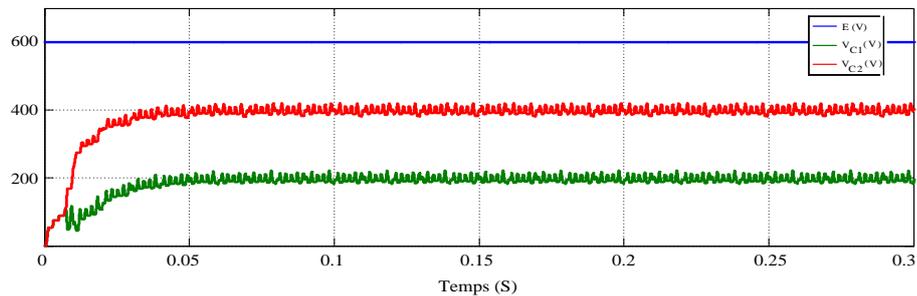


Figure 18 : Tension continue E et tensions des condensateurs flottants  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  fonctionnement normal.

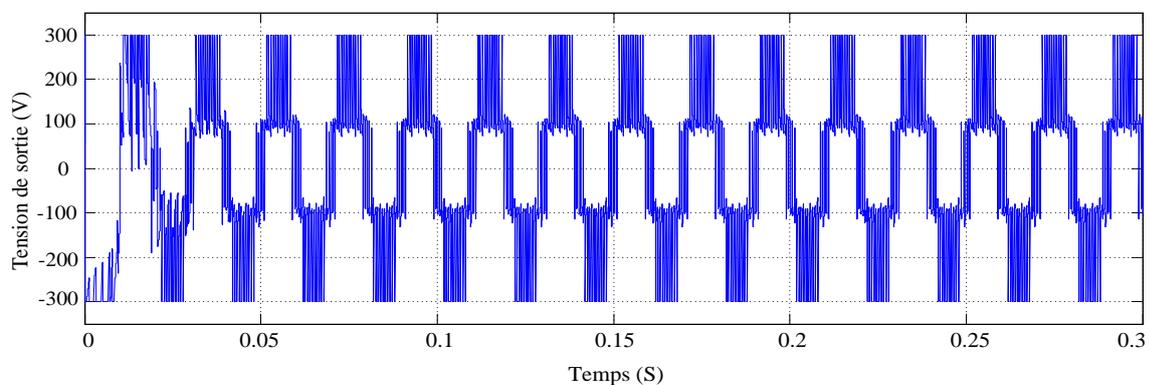


Figure 19 : Tension de sortie du convertisseur multicellulaire.

Lors d'un défaut d'interrupteur du convertisseur multicellulaire à l'instant 0.5 S les tensions des condensateurs flottants divergent de leurs valeurs de référence comme la figure 19 indique, la tension de sortie du convertisseur multicellulaire défectueux perd la forme multi niveaux comme la figure 20 présente.

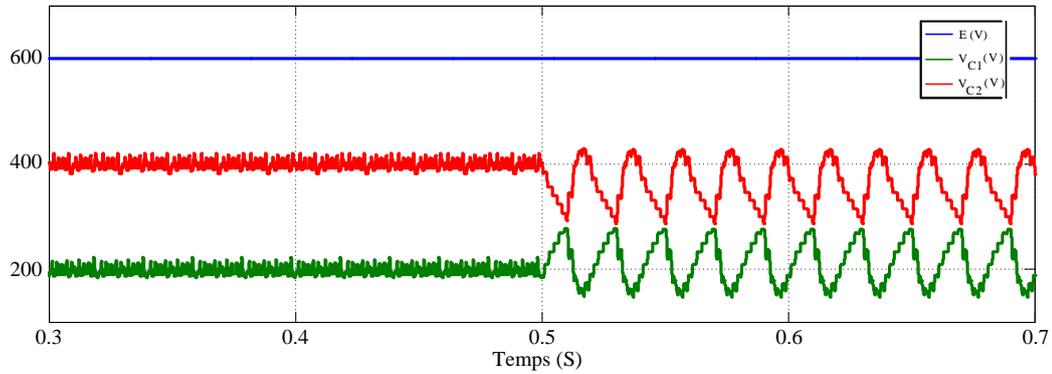


Figure 20 : Tension des condensateurs flottants  $V_{C1}$  et  $V_{C2}$  lors d'un défaut d'interrupteur.

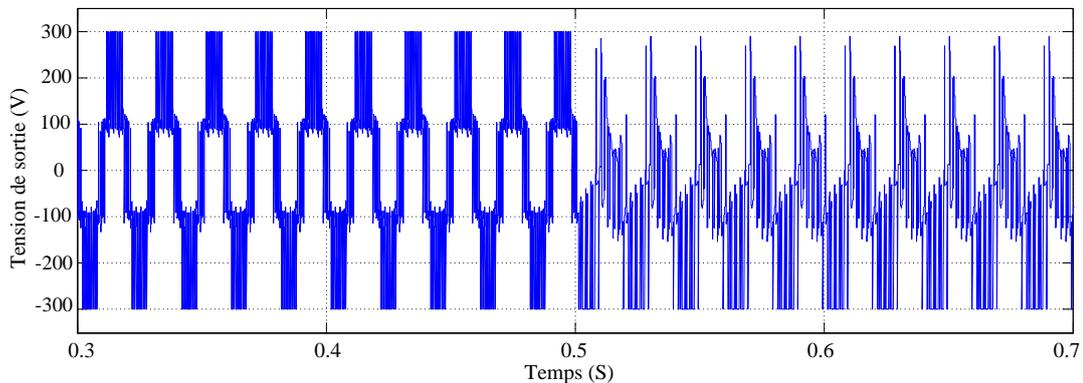


Figure 21 : Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur.

Pour résoudre le problème de la tension de sortie on applique la commande tolérante aux défauts par l'action des interrupteurs ( $S_{d1}$ ,  $S_{d2}$ ) à l'état passantes et les interrupteurs  $S_{n1}$ ,  $S_{n2}$  sont à l'état bloquée afin de permuté le fonctionnement au convertisseur deux niveaux et déconnecter le convertisseur multicellulaire. La figure 21 présente les tensions des condensateurs flottants lors de l'application de la commande tolérante aux défauts à l'instant 0.5 S, la tension de sortie dans la figure 22 présente deux niveaux lors de l'application de la commande tolérante aux défauts.

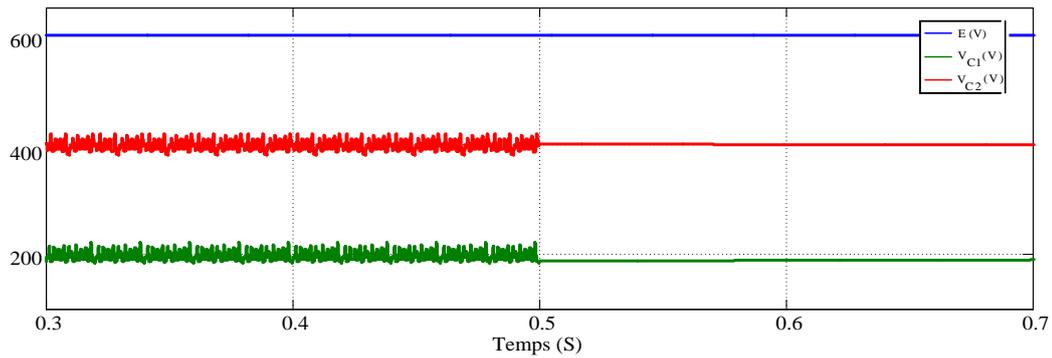


Figure 22 : Tension des condensateurs flottants  $V_{c1}$  et  $V_{c2}$  lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC.

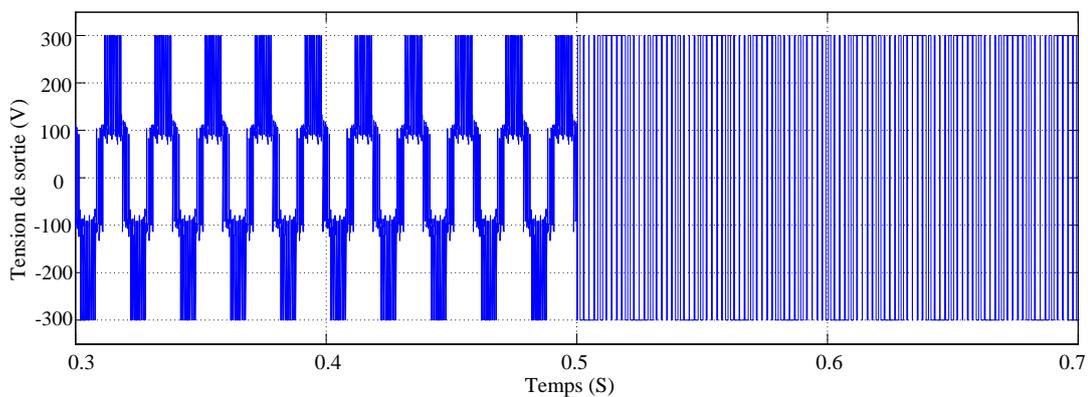


Figure 23 : Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC.

### 3.6. Expérimentation et résultats obtenu :

Nous utilisons le modèle de simulation Matlab pour le modèle avancé pour détecter et isoler les failles et déterminer l'indice de dérive, sa direction et l'évolution de la dérive.

En effet, pour confirmer une dérive, un certain nombre de points n'appartenant pas à la classe normale est nécessaire. Un nombre trop petit de points augmente le nombre de fausses détections tandis qu'un trop grand nombre de points évolutifs retarde la détection de dérive (nous utilisons un algorithme pour simplifier les vecteur  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  et minimiser les points, en suit algorithme de créait espace de représentation, d'abord indicateur de dériver en fin algorithme d'indicateur de direction).

Cependant, il convient de mentionner que l'impact des valeurs de ces paramètres sur les performances de détection et de confirmation de la dérive est faible grâce à la discrimination de puissance élevée de l'espace des fonctionnalités. En effet, la classe normale est bien séparée des classes de défauts et chaque classe de défauts est bien séparée des autres classes de défauts. Les pannes de ce convertisseur de puissance sont causées par des défauts de commutation simples et

multiples bloqués-ouverts et bloqués-fermés. Ces pannes brusques peuvent être vues à travers  $V_{c1}$  et  $V_{c2}$  comme une dégradation continue (dérive) des caractéristiques des conditions normales de fonctionnement (classe normale) due à un simple défaut dans l'un des interrupteurs **S1, S2 ou S3**, ou à plusieurs défauts d'interrupteurs (voir Tableau 2). La différence majeure entre l'approche proposée dans cette mémoire de fin étude les approches existantes, comme celles développées dans [36],[37], consiste à utiliser un indicateur de dérive comme indicateur de santé afin de détecter un défaut à ses débuts. En effet, une faille est considérée comme de type dérive. Par exemple, le commutateur commence à rester ouvert jusqu'à ce qu'il soit à **100%** bloqué ouvert. Les approches de l'état de la technique considèrent ce défaut comme un défaut brusque et, par conséquent, diagnostiquent ce défaut lorsque l'interrupteur est ouvert à **100%**. Un délai est donc nécessaire pour diagnostiquer ce défaut par ces approches. Bien que, l'approche proposée au but le diagnostic de cette faute avant qu'il ne devienne **100%** bloqué / ouvert, à savoir, avant d'atteindre la zone de bloquée-ouvert **100%**.

Par conséquent, l'approche proposée présente l'avantage de diagnostiquer un défaut plus rapidement que les approches traditionnelles de l'état de la technique.

### 1) Défaut Interrupteur simple Bloqué-ouvert :

(Figure 23) montre l'espace de fonction construit de la puissance à trois cellules convertisseur pour les conditions de fonctionnement normales et défectueuses du commutateur. Ces résultats sont obtenus pour les scénarios : **F1, F2 et F3** qui correspondent à différents défauts simples bloqués-ouverts dans les commutateurs du convertisseur, comme indiqué dans le tableau 2.

On peut remarquer que le contrôleur est capable de conduire la trajectoire du convertisseur à l'état souhaité dans le cas de conditions de fonctionnement normales. En effet, les tensions des condensateurs  $V_{c1}$  et  $V_{c2}$  sont régulées à leurs références  $\frac{E}{3} = 40 \text{ V}$  et  $\frac{2E}{3} = 80 \text{ V}$ , respectivement, comme le montre la Figure 23.

Cependant, pour différents défauts simples, on peut noter un changement anormal progressif de la trajectoire du convertisseur jusqu'à ce qu'il atteigne un état défectueux. Cela démontre la sensibilité du contrôleur à ces scénarios de fonctionnement défectueux, qui est détaillé comme suit :

- **S1 Bloqué-ouvert** : à partir de l'Equation 1, la dynamique du condensateur la tension  $V_{c1}$  est donnée par :  $\frac{dV_{c1}}{dt} = \frac{S_2}{C_1} i_L \geq 0$ .

Cela signifie que la tension du condensateur  $V_{c1}$  n'a aucune chance de se décharger. Cependant, le contrôleur, à son insu, tente de diminuer la valeur de  $V_{c1}$  en utilisant les modes

**q2 et q6.** Ce mode défectueux (**q2 et q6**) correspond respectivement à **q1 et q5** (voir tableau 1). Ainsi, tous les efforts du contrôleur sont convertis en une augmentation de la valeur de la tension du condensateur **Vc2** en utilisant les modes **q1 et q5**.

Après un temps spécifique, l'erreur dans la seconde la tension du condensateur atteint une valeur qui oblige le contrôleur à la considérer. À partir du tableau 1, le contrôleur doit utiliser les modes **q3 et q4** pour trouver un remède à la situation et diminuer la valeur de tension du deuxième condensateur. Dans ce cas défectueux, ces modes **q3 et q4** représentent le fonctionnement de **q3** dû au commutateur **S1** bloqué-ouvert. Le contrôleur peut diminuer la valeur **Vc2** mais la valeur du premier condensateur **Vc1** augmentera sans possibilité de la diminuer en mode **q3**. À la fin, le premier condensateur atteindra sa valeur maximale ( $V_{c1,ref} = \frac{E}{3} = 40V$ ) et le contrôleur doit le décharger en chargeant le deuxième condensateur comme décrit ci-dessus. Cette dernière atteint également sa valeur maximale ( $V_{c2,ref} = \frac{2E}{3} = 80V$ ), ce qui justifie la position de la région normale à **(40 V, 80 V)**.

À partir de (figure 24, figure 25 et Tableau 3 ), nous voyons que le simple défaut de commutation dans **S1** est détecté par **IE après 0.5143s** de son apparition, de plus il est bien isolé à l'aide du **Dr**. Cela permet à l'opérateur humain de supervision de prendre efficacement les actions appropriées.

- **S2 bloquée-ouvert** : A partir de L'équation 1, la dynamique des tensions des condensateurs est donnée par :  $\frac{dV_{c1}}{dt} = -\frac{S_1}{C_1} i_L \leq 0$  et  $\frac{dV_{c2}}{dt} = \frac{S_3}{C_2} i_L \geq 0$ .

Cela signifie que la tension du condensateur **Vc1** n'a pas chance d'être chargé et la tension du condensateur **Vc2** n'a aucune chance d'être déchargée. Suite à la même analyse de **S1** coincé - ouvert, tous les efforts du contrôleur conduisent à réduire **Vc1** à sa valeur minimale Interpréter de **10 V** et à diminuer **Vc2** à sa valeur minimale de **50 V** avec une dégradation progressive comme le montre la figure 23.

Nous pouvons voir à partir de figure 24 que le défaut de commutation simple dans **S2** est détecté par **IE après 0,5210 s** après son apparition et il est bien isolé à l'aide du **Dr**.

- **S3 bloqué-ouvert** : Dans ce cas, la tension d'entrée est déconnectée et il n'y a pas de transfert d'énergie de la source vers la charge. Par conséquent, l'énergie stockée dans différents condensateurs sera consommée par la charge. Cela confirme le changement anormal

progressif de la trajectoire du convertisseur jusqu'à ce qu'il atteigne l'origine comme le montre la figure 23.

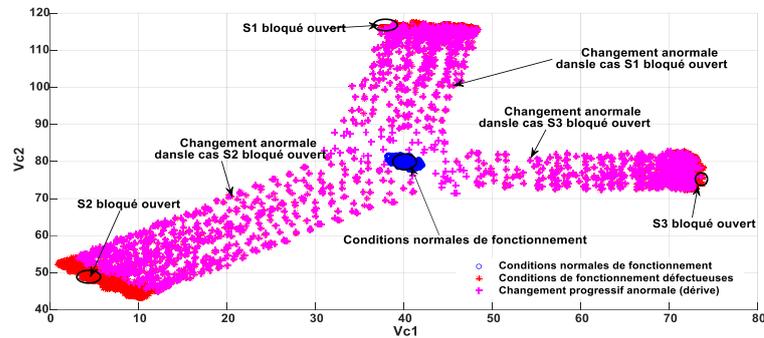


Figure 24 : Espace de fonction du commutateur de convertisseur de puissance à trois cellules normal et condition de panne dans le cas d'un simple défaut interrupteur bloqué-ouvert.

À partir de figure 24 et figure 25 et tableau 3, nous pouvons voir que le défaut de commutation simple dans **S3** est détecté après **0,5235s** de l'apparition du défaut par **IE** et il est bien isolé par le **Dr**.

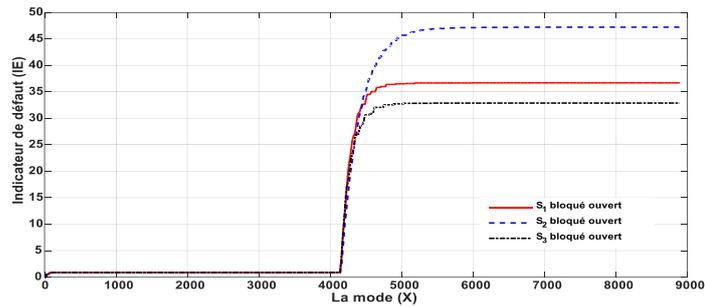


Figure 25 : Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.

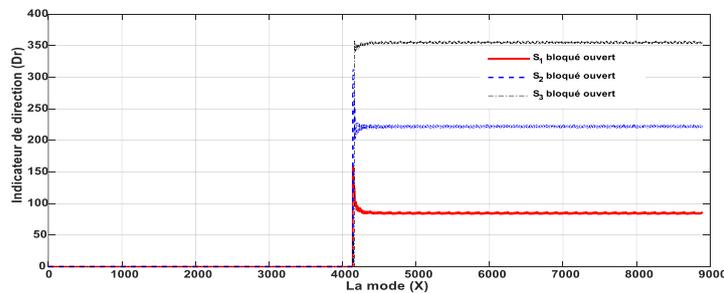


Figure 26 : Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive.

Tableau 3 : Résultats de la détection des défauts dans l'interrupteur du convertisseur de puissance pour les 12 scénarios.

<i>Type</i>	<i>Défaut <math>F_i</math></i>	<i>interrupteur</i>	<i>Temps de détection</i>
<i>Défaut simple Bloqué ouvert</i>	$F_1$	$S_1$	<b>0.5143 s</b>
	$F_2$	$S_2$	<b>0.5210 s</b>
	$F_3$	$S_3$	<b>0.5235 s</b>
<i>Défaut simple Bloqué fermé</i>	$F_4$	$S_1$	<b>0.6045 s</b>
	$F_5$	$S_2$	<b>0.6092 s</b>
	$F_6$	$S_3$	<b>0.5479 s</b>
<i>Défauts multiples Bloqué ouvert</i>	$F_7$	$S_1$ et $S_2$	<b>0.3079 s</b>
	$F_8$	$S_1$ et $S_3$	<b>0.3115 s</b>
	$F_9$	$S_2$ et $S_3$	<b>0.3265 s</b>
<i>Défauts multiples Bloqué fermé</i>	$F_{10}$	$S_1$ et $S_2$	<b>0.3418 s</b>
	$F_{11}$	$S_1$ et $S_3$	<b>0.3131 s</b>
	$F_{12}$	$S_2$ et $S_3$	<b>0.3147 s</b>

## 2) Défaut Interrupteur simple bloqué-fermé :

Contrairement aux scénarios précédents, dans ce cas, nous avons considéré un interrupteur de défaut simple bloqué-fermé (**F4, F5 et F6**).

Cela que le contrôleur est incapable de maintenir la trajectoire du convertisseur à l'état souhaité et que ses efforts, dans différentes opérations défectueuses, conduisent la trajectoire du système en boucle fermée vers un équilibre indésirable.

La dégradation anormale de la normale les conditions de fonctionnement du convertisseur de puissance changent progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un état défectueux comme détaillé ci-dessous.

- **S1 bloqué-fermé** : Dans ce cas, la dynamique du condensateur la tension **Vc1** est donnée par :

$$\frac{dV_{c1}}{dt} = \frac{S_2-1}{C_1} i_L \leq 0, \text{ ce qui signifie qu'elle n'a aucune chance d'être chargée.}$$

Le contrôleur essaie d'augmenter la valeur **Vc1** en utilisant le mode **q3** ou le mode **q7** comme indiqué dans le tableau 1.

Cependant, ces modes (**q3 et q7**) correspondent respectivement à **q4 et q8** dans ce mode défectueux. Ainsi, tous les efforts du contrôleur conduisent à une valeur croissante de la tension du condensateur **Vc2** en utilisant les modes **q4 et q8**.

Après un certain temps, l'erreur dans la tension du second condensateur atteint une valeur qui oblige le contrôleur à la prendre en compte.

D'après le tableau 2, le contrôleur doit utiliser le mode **q5** ou le mode **q6** pour remédier à la situation et augmenter la valeur de tension du deuxième condensateur. Dans ce cas défectueux, ces modes correspondent au mode **q6** et le contrôleur peut réussir à augmenter la valeur de **Vc2** mais le premier condensateur **Vc1** diminuera sans possibilité de l'augmenter.

- **S2 bloqué fermé** : à partir de l'Equation 1 , la dynamique des tensions du condensateur est donnée par : 
$$\frac{d Vc_1}{dt} = \frac{1 - U_1}{c_1} i_L \geq 0 \quad \text{et} \quad \frac{d Vc_2}{dt} = \frac{U_3 - 1}{c_1} i_L \leq 0.$$

Cela signifie que la tension du condensateur **Vc1** n'a aucune chance à décharger contrairement à la tension du condensateur **Vc2**, qui n'a aucune chance d'être chargée. La trajectoire du système en boucle fermée atteint un état équilibré correspondant à une part égale de la tension d'entrée.

- **S3 bloqué-fermé** : Dans ce cas, la tension d'entrée est toujours connectée et aucune possibilité de décharger le deuxième condensateur, qui est proche de la source de tension d'entrée. Par conséquent, le deuxième condensateur sera complètement chargé dans ce cas défectueux.

Le contrôleur essaie de le décharger en agissant sur le signal d'entrée **u2** pour fermer l'interrupteur correspondant, cependant, cela augmente la tension du premier condensateur.

Comme on peut le voir sur La figure 26 et figure 27, le simple défaut d'interrupteur bloqué-fermé dans **S1, S2 et S3** est détecté avec succès par l'indicateur **IE** et bien isolé à l'aide de l'indicateur de direction **Dr**. Ces défauts sont détectés à un stade précoce après leur début (voir le tableau 3). Cela aide l'opérateur humain à effectuer une supervision.

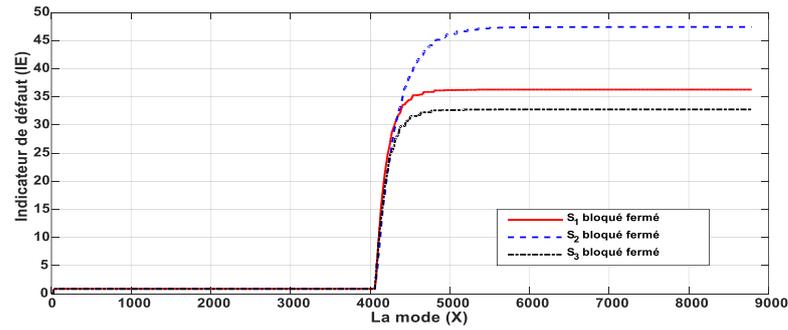


Figure 27 : Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.

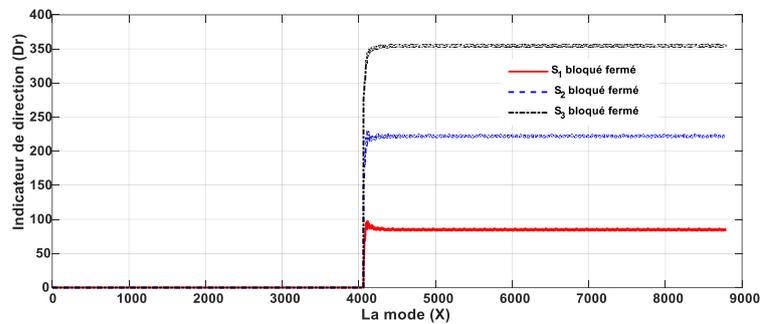


Figure 28 : Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive.

### 3) Défaut Interrupteur Multiples bloqués-ouverts :

Les scénarios envisagés sont plusieurs défauts bloqués ouverts : **F7, F8 et F9** comme indiqué dans le tableau2. Il est clair que le contrôleur est incapable de suivre la trajectoire de convertisseur à l'état souhaité où un changement anormal progressive peut être vu pour chaque scénario jusqu'à ce qu'il atteigne un état défectueux (voir figure 28).

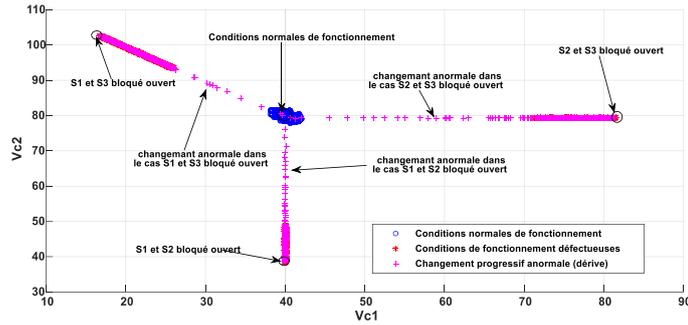


Figure 29 : Espace de fonction du l'interrupteur de convertisseur de puissance à trois cellules, des conditions de fonctionnement normales et de panne dans le cas de Multiples interrupteurs défectueux bloqués-ouverts.

L'analyse suivante, pour chaque cas défectueux, met en évidence les résultats obtenus :

- **Défaut Interrupteur Multiples bloqués-ouverts (S1 et S2) :**

Sur la base du modèle de convertisseur, la dynamique des tensions de condensateur est donnée par :

$$\frac{d V_{c1}}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d V_{c2}}{dt} = \frac{S_3}{C_2} i_L \geq 0.$$

Par conséquent, la tension du condensateur  $V_{c1}$  est constante et il est égal à sa valeur juste avant la panne, qui correspond à  $V_{c1,ref} = 40 \text{ V}$ .

De plus, la tension du condensateur,  $V_{c2}$  n'a aucune chance de se décharger et tous les efforts du contrôleur sont traduits en mode de charge jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur maximale de  $V_{c2} = \frac{E}{3}$ .

Cela justifie la position de la région défectueuse du scénario **F7** ( $V_{c1} = 40 \text{ V}$ ,  $V_{c2} = 40 \text{ V}$ ) comme indiqué sur figure 28.

À partir de la figure 29, figure 30 et tableau 3, nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans **S1 et S2** sont détectés après **0,3079s** à partir de l'apparition du défaut par **IE**. De plus, ils sont bien isolés par **Dr**.

• **Défaut Interrupteur Multiples bloqués-ouverts (S1 et S3) :**

Dans ce cas, la source de tension **E** est déconnectée et l'énergie restante est stockée dans les deux condensateurs juste avant la panne (**Vc1 = 40 V, Vc2 = 80 V**).

À partir de l'Equation 1 , la dynamique des tensions des condensateurs est donnée par :

$$\frac{d V_{c1}}{dt} = \frac{S_2}{C_1} i_L \geq 0 \text{ et } \frac{d V_{c2}}{dt} = -\frac{S_2}{C_2} i_L \leq 0.$$

Ainsi, la tension **Vc1** sera augmenté et la tension **Vc2** sera diminué sans alimentation de la tension d'entrée.

À l'état d'équilibre **on** peut prouver à partir du modèle de convertisseur que le courant de charge est égal à zéro et cela correspond à un état équilibré comme le montre la Figure 21.

À partir de figure 29, figure 30 et tableau 3, nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans **S1 et S3** sont détectés après **0.3115s** après l'apparition du défaut par **IE** et ils sont bien isolés par le **Dr**.

• **Multiples interrupteurs bloqués-ouverts (S2 et S3) :**

Dans ce cas, la dynamique du condensateur **C<sub>2</sub>** est  $\frac{d V_{c2}}{dt} = 0$ , ce qui signifie que la tension du second condensateur gardera la dernière valeur dans des conditions de fonctionnement normales juste avant la panne (**Vc2 = 80 V**) comme présenté sur figure 28. Cependant, la tension **Vc1** du premier condensateur **C<sub>1</sub>** sera augmentée Ceci peut être examiné par sa dynamique après la panne :

$$\frac{d V_{c1}}{dt} = -\frac{S_1}{C_1} i_L \leq 0.$$

Le contrôleur tentera d'inverser la décharge de **Vc1** en agissant sur l'interrupteur **S<sub>1</sub>**. Cela conduit le convertisseur à être soit en **q2**, soit en **q1**. Lorsqu'il est en **q1** (voir le tableau 1), il augmentée **Vc1**. À l'état équilibré, **Vc2** sera Équilibré, pas de grand changement.

Comme le montrent figure 29, figure 30 et tableau 3, nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans **S2 et S3** sont détectés après **0,3265s** après l'apparition du défaut par **IE** et ils sont bien isolés par le **Dr**.

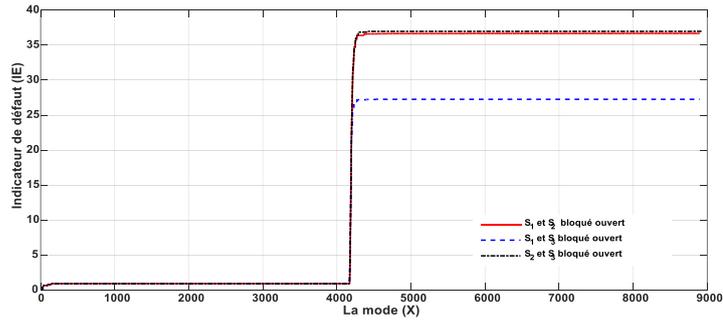


Figure 30 : Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.

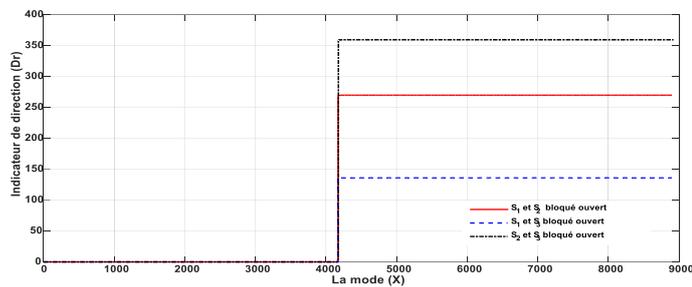


Figure 31 : Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive.

#### 4) Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés :

Les scénarios **F10**, **F11** et **F12** correspondant à un défaut interrupteur multiple bloqué-fermé ont été appliqués au convertisseur commandé.

Qui confirme la sensibilité des pannes de commutateurs multiples du contrôleur. L'analyse du convertisseur sous ces cas défectueux peut mettre en évidence le résultat.

##### • Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés (S1 et S2) :

Dans ce cas et à partir du modèle de convertisseur, la dynamique du condensateur les tensions sont données par :  $\frac{dV_{c1}}{dt} = 0$  et  $\frac{dV_{c2}}{dt} = \frac{U_{3-1}}{C_2} i_L \leq 0$ .

Ainsi, la tension du condensateur **Vc1** gardera la dernière valeur juste avant la panne, ce qui correspond à **40V**.

Cependant, le second condensateur présente un comportement décroissant malgré les efforts du contrôleur, ce qui conduit à un état équilibré correspondant à la position de la région défectueuse (**vC1 = 40V, vC2 = 40 V**)

• **Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés (S2 et S3) :**

Dans ce cas, la dynamique de la tension du condensateur  $V_{c2}$  est  $\frac{dV_{c2}}{dt} = 0$ , ce qui signifie que la tension du second condensateur conservera la dernière valeur dans des conditions de fonctionnement normales juste avant la panne ( $V_{c2} = 80 \text{ V}$ ).

D'autre part, le premier condensateur a la dynamique  $\frac{dV_{c1}}{dt} = \frac{1-U_1}{c_1} i_L \geq 0$ .

Ceci justifie le mode de charge du premier condensateur jusqu'à ce qu'il atteigne un état équilibré du système en boucle fermée ( $80 \text{ V}, 80 \text{ V}$ ).

• **Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés (S1 et S3):**

La dynamique des tensions des condensateurs est :

$$\frac{dV_{c1}}{dt} = \frac{U_2-1}{c_1} i_L \leq 0 \text{ et } \frac{dV_{c2}}{dt} = \frac{1-U_2}{c_2} i_L \geq 0.$$

Ceci justifie la valeur décroissante de  $V_{c1}$  et la valeur croissante de  $V_{c2}$  jusqu'à l'état équilibré ( $20 \text{ V}, 100 \text{ V}$ ) du système en boucle fermée.

À partir de la figure 31 , figure 32 et tableau 3 nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  sont détectés avec succès par l'indicateur **IE** et bien isolé par **Dr**.

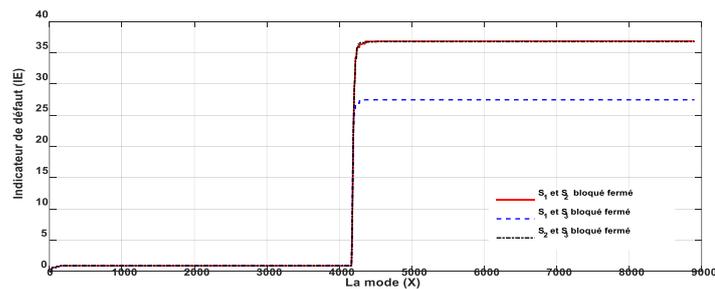


Figure 32 : Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne.

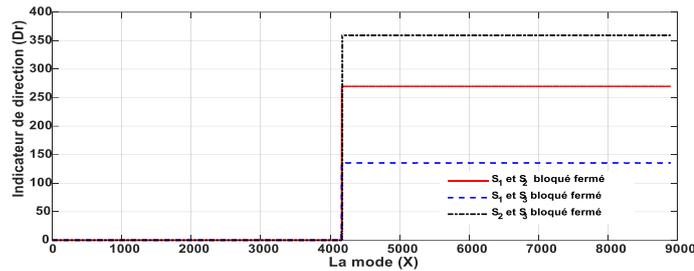


Figure 33 : Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive.

### 3.7. Conclusion :

Ce chapitre a été dédié à l'implémentation de l'approche proposée pour le diagnostic précoce des défauts d'interrupteur du convertisseur de puissance multicellulaire, des résultats de simulation obtenus en utilisant un Benchmark sous Matlab/Simulink a été fournie, l'indicateur de dérives mesurant la différence entre les conditions normales et l'état de fonctionnement en cours est utilisé afin de détecter une dérive (dégradations) à un stade précoce. Lorsqu'une dégradation (défaut) est détectée, l'isolement est réalisé en tenant compte de la direction de l'évolution de la classe dans l'espace de représentation et les Résultats de la détection de défaut dans l'interrupteur du convertisseur de puissance pour les douze scénarios de défaut résumé dans le Tableau 3.

Ces résultats peuvent être utilisées comme critère d'évaluation pour mettre en évidence la contribution de l'approche proposée. Cela permet de réaliser un diagnostic précoce des défauts et aide ainsi les opérateurs humains à effectuer une supervision efficace.

**Chapitre IV**

**CONCLUSION GENERALE**

#### 4. Conclusion générale et perspective :

Ce mémoire de fin d'étude propose une approche basée sur l'utilisation des techniques d'apprentissage automatique intégrant un mécanisme de détection de dérive permettant d'effectuer un diagnostic précoce des défauts de commutateurs simples et multiples de type bloqués-fermés et bloqués-ouverts dans le convertisseur électrique multicellulaire. Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire illustre une approche efficace de diagnostic prédictif et d'une structure de convertisseur multicellulaire tolérante aux défauts, ce manuscrit est divisé en deux parties principales.

Après une introduction générale positionnant le contexte général et les défis scientifiques, un deuxième chapitre consacré à une étude bibliographique sur le diagnostic prédictif et la commande tolérante aux défauts (FTC) a été illustré. Ensuite nous avons abordé la partie convertisseurs de puissance, et la description de l'éolienne à base de MADA et son fonctionnement.

Le troisième chapitre, présente l'approche proposée et les résultats obtenus en utilisant le modèle Benchmark implémenté sous MATLAB, l'étape de la construction d'un espace de représentation a été illustré ensuite l'étape de la conception du classificateur, la mise à jour de ses paramètres et de sa structure pour avoir une fonction de décision qui sépare les différentes classes dans l'espace de caractéristiques. Ensuite, deux indicateurs ont été utilisés, un indicateur de dérive qui mesure la dissimilarité entre les caractéristiques des classes normales et évolutives réalisée par le calcul en ligne de la distance euclidienne dans l'espace de représentation et un autre indicateur de direction de dérive qui surveille l'évolution de la classe dans l'espace de représentation. Finalement une nouvelle structure de convertisseur DC/AC a été proposé et les résultats obtenus sous MATLAB pour le diagnostic des défauts simples et multiples de type bloqués-fermés et bloqués-ouverts des interrupteurs de convertisseur de puissance multicellulaire ont été illustré.

Comme perspective l'intégration d'un module de pronostic permettant de prédire le temps résiduel avant la défaillance totale du convertisseur multicellulaire. Le concept PHM «Prognostics and Health Management» a globalement pour principe de transformer un ensemble de données brutes recueillies sur l'équipement surveillé en indicateurs de santé, dont l'extrapolation dans le temps permet de définir la durée de vie utile restante, communément appelé le RUL (Remaining Useful Life), qui est la durée pendant laquelle un équipement est susceptible de fonctionner avant de devoir être réparé ou remplacé. En tenant compte de RUL, les ingénieurs peuvent planifier la maintenance, optimiser l'efficacité opérationnelle et éviter les temps d'arrêt imprévus. Pour cette raison, l'estimation du RUL est une priorité absolue dans les programmes de maintenance proactive. Un module

d'estimation RUL prédit non seulement le RUL, mais fournit également un intervalle de confiance sur la prédiction. Les entrées du modèle sont des indicateurs de dégradation, des caractéristiques extraites de données de capteur, ou des données enregistrées dont le comportement change de manière prévisible lorsque le système se dégrade ou fonctionne dans différents modes.

# Bibliographie

### Bibliographies :

- [1] M. A. Benlahrache, "Commande prédictive, et commande tolérante aux défauts appliquées au système éolien." 2016.
- [2] B. González-Contreras, "Contribution à la Tolérance aux Défauts des Systèmes Linéaires: Synthèse de Méthodes d'Accommodation Fondée sur l'Information du Second Ordre." 2009.
- [3] H. Toubakh and M. Sayed-Mouchaweh, "Hybrid dynamic classifier for drift-like fault diagnosis in a class of hybrid dynamic systems: Application to wind turbine converters," *Neurocomputing*, vol. 171, pp. 1496–1516, 2016, doi: 10.1016/j.neucom.2015.07.073.
- [4] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, and R. C. P. Guisado, "Ma. Angeles Martin Prats, Jose Ignacio Leon, and Narciso Moreno-Alfonso, 'Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey.,'" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1017, 2006.
- [5] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators," *Renew. energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2369–2385, 2007.
- [6] J. Mavier, "Convertisseurs génériques à tolérance de panne-Applications pour le domaine aéronautique." Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2007.
- [7] F. Richardeau, J. Mavier, H. Piquet, and G. Gateau, "Fault-tolerant inverter for on-board aircraft EHA," in *2007 European conference on power electronics and applications*, 2007, pp. 1–9.
- [8] E. R. Loures, "Surveillance et diagnostic des phases transitoires des systèmes hybrides basés sur l'abstraction des dynamiques continues par réseau de Petri temporel flou." 2006.
- [9] A. Villemeur, "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Fiabilité—Facteurs humains—Informatisation, Eyrolles, Coll," *Etudes Rech. d'Electricité Fr. Paris*, 1988.
- [10] C. COMBASTEL, "Méthodes d'Aide à la Décision pour la Détection et la Localisation de Défauts dans les Entraînements Electriques." pp. 1–259, 2000.

## Bibliographie

---

- [11] L. Kamoun, M. Ilhem, S. Belkhoja, and N. Masmoudi, "Surveillance des systèmes électroniques de puissance embarqués dans le véhicule électrique." Doctoral thesis of the National School of Engineers sfax, 2004.
- [12] M. Basseville, "Detecting changes in signals and systems-A survey," *Automatica*, vol. 24, no. 3, pp. 309–326, 1988, doi: 10.1016/0005-1098(88)90073-8.
- [13] D. De and U. Henri, "Contribution aux systèmes tolérants aux défauts : Synthèse d'une méthode de reconfiguration et/ou de restructuration integrant la fiabilité des composants," vol. 33, no. 0. 2007.
- [14] B. M. T. BABAHAMOU HOUCINE and H. TOUBAKH, "Diagnostic Prédicatif des Défauts Capteurs Dans un Système Eolienne en Utilisant les Approches d'Apprentissage Automatique."
- [15] H. Toubakh, "Automated on-line early fault diagnosis of wind turbines based on hybrid dynamic classifier." Lille 1, 2015.
- [16] J. P. Ferrieux and F. Forest, "Alimentations à découpage-convertisseurs à résonance. principe-modélisation-composants." Masson, 1987.
- [17] G. Séguier, R. Bausière, and F. Labrique, *L'électronique de puissance*. Dunod, 1978.
- [18] N. E. Wu, "Reliability of fault tolerant control systems: Part I," in *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*, 2001, vol. 2, pp. 1460–1465.
- [19] J. Chen and R. J. Patton, "Fault-tolerant control systems design using the linear matrix inequality method," in *2001 European Control Conference (ECC)*, 2001, pp. 1993–1998.
- [20] R. J. Patton, "Fault-Tolerant Control: The 1997 Situation," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 30, no. 18, pp. 1029–1051, 1997, doi: 10.1016/s1474-6670(17)42536-5.
- [21] S. K. Kanev, *Robust fault-tolerant control*. FEBO-DRUK, 2004.
- [22] C.-A. Huraux and M. Herrmann, "L ' énergie éolienne et son exploitation au Québec : un aperçu des enjeux socio-économiques," *Cah. Rech. Pap.*, pp. 1–69, 2015.
- [23] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.-A. Cutululis, and E. Ceanga, *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach (Munteanu, I. et al.; 2008) [Bookshelf]*, vol. 29, no. 3. Springer Science & Business Media, 2009.

- [24] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, vol. 2. Wiley Online Library, 2011.
- [25] F. D. Bianchi, H. De Battista, and R. J. Mantz, *Wind turbine control systems: Principles, modelling and gain scheduling design*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [26] A. HANDJAR, “Diagnostic Prédicatif des Défaits Dans un Système Eolien en Utilisant les Techniques de l’intelligence Artificielle.”
- [27] S. E. Rezgui and H. Benalla, “Commande de machine électrique en environnement Matlab/Simulink et temps réel.” Université Mentouri Constantine.
- [28] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, “An industry-based survey of reliability in power electronic converters,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, 2011.
- [29] E. Wolfgang, “Examples for failures in power electronics systems,” *ECPE Tutor. Reliab. power Electron. Syst. Nuremberg, Ger.*, pp. 19–20, 2007.
- [30] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, and P. Tavner, “Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2049377.
- [31] M. S. Nejad, “Architectures d’alimentation et de commande d’actionneurs tolérants aux défauts: régulateur de courant non linéaire à large bande passante.” Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, p. 165, 2007.
- [32] J. Van Gorp, A. Giua, M. Defoort, and M. Djemai, “Active diagnosis for a class of switched systems,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2013, pp. 5003–5008, doi: 10.1109/CDC.2013.6760674.
- [33] M. Derbal and H. Toubakh, “Early Fault Diagnosis in Exciting Capacitors of Self-Excited Induction Generator for Wind Energy Applications,” in *Proceedings - International Conference on Communications and Electrical Engineering, ICCEE 2018*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/CCEE.2018.8634495.

- [34] M. Traore, A. Chammas, and E. Duviella, "Supervision and prognosis architecture based on dynamical classification method for the predictive maintenance of dynamical evolving systems," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 136, pp. 120–131, 2015, doi: 10.1016/j.ress.2014.12.005.
- [35] A. Widodo and B. S. Yang, "Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 2560–2574, 2007, doi: 10.1016/j.ymsp.2006.12.007.
- [36] M. Demetgul, "Fault diagnosis on production systems with support vector machine and decision trees algorithms," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 9–12, pp. 2183–2194, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4639-5.
- [37] M. Galagedarage Don and F. Khan, "Process fault prognosis using hidden markov model-bayesian networks hybrid model," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, no. 27, pp. 12041–12053, 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b00524.
- [38] M. Galagedarage Don and F. Khan, "Dynamic process fault detection and diagnosis based on a combined approach of hidden Markov and Bayesian network model," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 201, pp. 82–96, 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.01.060.
- [39] R. Isermann and R. Isermann, "Fault detection with Principal Component Analysis (PCA)," in *Fault-Diagnosis Systems*, Springer, 2006, pp. 267–278.
- [40] M. Ahmed, M. Baqqar, F. Gu, and A. D. Ball, "Fault detection and diagnosis using Principal Component Analysis of vibration data from a reciprocating compressor," in *Proceedings of the 2012 UKACC International Conference on Control, CONTROL 2012*, 2012, pp. 461–466, doi: 10.1109/CONTROL.2012.6334674.
- [41] H. N. Koivo, "Artificial neural networks in fault diagnosis and control," *Control Eng. Pract.*, vol. 2, no. 1, pp. 89–101, 1994, doi: 10.1016/0967-0661(94)90577-0.
- [42] H. N. Koivo, "Artificial neural networks in fault diagnosis and control," in *Control Engineering Practice*, vol. 2, no. 1, Springer, 1994, pp. 89–101.

- [43] G. Vachkov and H. Matsuyama, "Identification of Fuzzy Rule Based System for Fault Diagnosis in Chemical Plants," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 25, no. 4, pp. 79–82, 1992, doi: 10.1016/s1474-6670(17)50220-7.
- [44] S. R. Samantaray, "A systematic fuzzy rule based approach for fault classification in transmission lines," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 928–938, 2013, doi: 10.1016/j.asoc.2012.09.010.
- [45] L. B. Jack and A. K. Nandi, "Fault detection using support vector machines and artificial neural networks, augmented by genetic algorithms," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 16, no. 2–3, pp. 373–390, 2002, doi: 10.1006/mssp.2001.1454.
- [46] M. A. Rodríguez, A. Claudio, D. Theilliol, and L. G. Vela, "A new fault detection technique for IGBT based on gate voltage monitoring," in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2007, pp. 1001–1005, doi: 10.1109/PESC.2007.4342127.
- [47] R. Pagano, Y. Chen, K. Smedley, S. Musumeci, and A. Raciti, "Short circuit analysis and protection of power module IGBTs," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2005, vol. 2, pp. 777–783, doi: 10.1109/APEC.2005.1453063.
- [48] B. Lu and S. K. Sharma, "A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 5, pp. 1770–1777, 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2027535.
- [49] M. Defoort, M. Djemai, T. Floquet, and W. Perruquetti, "Robust finite time observer design for multicellular converters," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 42, no. 11, pp. 1859–1868, 2011, doi: 10.1080/00207721.2010.543494.
- [50] K. Benmansour, A. Benalia, M. Djemaï, and J. de Leon, "Hybrid control of a multicellular converter," *Nonlinear Anal. Hybrid Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 16–29, 2007, doi: 10.1016/j.nahs.2006.06.001.
- [51] G. Gateau, M. Fadel, P. Maussion, R. Bensaid, and T. A. Meynard, "Multicell converters: Active control and observation of flying-capacitor voltages," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 998–1008, 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.803200.

- [52] L. Hetel, M. Defoort, and M. Djemai, "Binary Control Design for a Class of Bilinear Systems: Application to a Multilevel Power Converter," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 719–726, 2016, doi: 10.1109/TCST.2015.2460696.