



# **Etat de l'Art sur la Commande Sensorless et le Diagnostic des Défaits d'IGBTs dans un Convertisseur Statique**

1.	Introduction .....	22
2.	Commande sans capteur de vitesse des machines à courant alternatif .....	22
2.1.	Approche sans modèle.....	24
2.2.	Approche à base de modèle.....	24
3.	Défauts dans les onduleurs triphasés.....	27
2.3.	Structure de la chaîne de conversion d'énergie à base d'un onduleur triphasé .....	27
2.4.	Mode de défaillance des éléments de puissance dans un onduleur .....	29
3.2.1.	Défaut de type court-circuit.....	30
3.2.2.	Défaut de type circuit-ouvert.....	31
4.	Diagnostic de défauts .....	32
4.1.	Méthodes de diagnostic et classification .....	32
4.2.	Diagnostic de défauts de type circuit-ouvert des composants de puissance dans un convertisseur statique .....	35
4.2.1.	Approche signal.....	35
4.2.2.	Approche modèle .....	37
5.	Synthèse sur l'état de l'art .....	40
5.1.	Particularités de fonctionnement des structures sans capteur en mode dégradé.....	40
5.2.	Limitations des techniques classiques de diagnostic .....	41
6.	Conclusion.....	43

## 1. Introduction

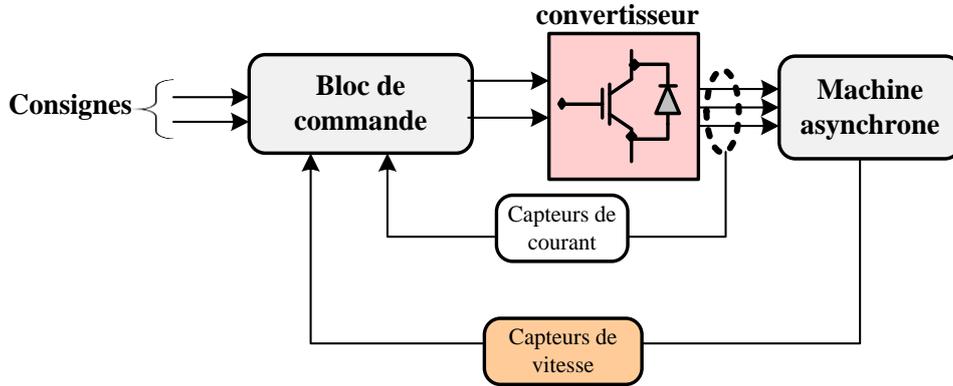
L'objectif de cette thèse est de proposer des algorithmes de contrôle moderne regroupant des stratégies de diagnostic et de commande en vitesse sans capteur mécanique d'une machine asynchrone triphasée en présence de défauts simples ou multiples d'ouverture des IGBT dans l'onduleur. Les travaux de recherche réalisés dans ce contexte concernent généralement les modes de défaillance et le diagnostic des défauts du convertisseur dans le cas d'un fonctionnement avec capteur mécanique de vitesse. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons à l'étude de ces défauts dans le cas d'un fonctionnement sans capteur de vitesse.

Pour aborder la problématique posée, un état de l'art sur les différentes techniques d'observation en vue de la commande sans capteur de vitesse des machines à courant alternatif sera tout d'abord présenté. Ensuite, une étude bibliographique sur les modes de défaillance du convertisseur statique, sujet de notre thèse, sera menée. Les différentes stratégies proposées dans la littérature pour la détection et d'identification des défauts liés aux cellules de commutation dans les convertisseurs de type DC/AC seront aussi présentées et discutées à la fin de ce chapitre. Cette étude bibliographique se termine par une synthèse permettant de situer notre objectif par rapport à ce qui est déjà fait dans cette thématique.

## 2. Commande sans capteur de vitesse des machines à courant alternatif

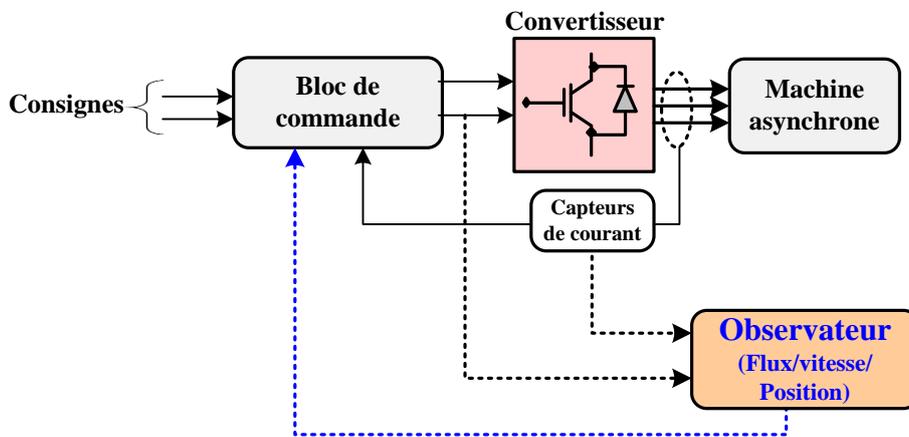
Grâce à l'apport de nouveaux développements technologiques dans le domaine de l'électronique numérique, de l'électronique de puissance et les stratégies de contrôle, il est possible de mettre en place de nouveaux contrôleurs plus robustes et plus fiables pour être intégrés dans des applications de haute performance. Parmi les applications les plus attractives pour les entraînements à vitesse variable on cite le transport, la robotique, la traction électrique, la production de l'énergie éolienne et hydrolienne, etc. Prenant le cas de la machine asynchrone, sa commande nécessite des informations sur l'évolution de son état par la mesure des courants, des tensions statoriques et de la vitesse de rotation. Les autres grandeurs nécessitent des capteurs (électriques ou mécaniques) qui ne sont pas toujours disponibles en raison de leurs coûts élevés et de leur sensibilité au bruit et aux effets thermiques. En outre, la vitesse du rotor est exprimée en fonction du courant statorique et du flux rotorique alors que la mesure de ce dernier n'est pas toujours accessible notamment pour la nouvelle génération des machines électriques intégrées avec leurs convertisseurs. Elle nécessite d'utiliser des capteurs coûteux et

physiquement compliqués à installer à l'intérieur de la machine. Ces contraintes limitent l'utilisation de capteurs voire impossible de les intégrer dans certaines applications.



**Figure 1.1 :** Structure de contrôle d'une machine asynchrone avec capteur.

Pour surmonter ces contraintes, la théorie d'observation fournit une solution attractive pour reconstruire l'état non mesurable ou remplacer certains capteurs dans la machine en utilisant ce qu'on appelle "observateur". Cette théorie permet la détermination d'un modèle d'estimation d'état en utilisant les grandeurs mesurables du système pour construire le capteur logiciel, elle a été utilisée pour la première fois en 1975 [Abbo-1975]. Plusieurs techniques ont été ensuite développées dans le but de l'implantation des lois de commande modernes sans capteurs.



**Figure 1.2 :** Structure de contrôle d'une machine asynchrone sans capteur.

Les méthodes d'observation couramment utilisées pour l'estimation de la vitesse mécanique des moteurs asynchrones peuvent être synthétisées suivant deux approches basiques : approche sans modèle et approche avec modèle :

## 2.1. Approche sans modèle

Cette approche est basée sur la géométrie de la machine en exploitant les harmoniques d'encoches présents dans les courants du stator. L'estimation de la vitesse de la machine est basée sur l'injection des signaux de tension hautes fréquences allant de plusieurs centaines de Hertz à plusieurs kilo-Hertz [Jans-1996], [Holt-2000], [Wolb-2005], [Brand-2011], [Zhen-2008]. Les méthodes d'injection de tension de type onde carrée ont été récemment introduites [Yoon-2011], [Yoon-2014], elles permettent d'offrir des performances d'entraînement sans capteur meilleures que les méthodes conventionnelles d'injection de signal de tension sinusoïdale.

Ces méthodes sont généralement proposées pour surmonter les difficultés d'estimation des variables d'état de la machine à basse vitesse mais leur application reste toujours limitée à cause des effets indésirables de la saturation magnétique.

## 2.2. Approche à base de modèle

Cette approche est basée sur la modélisation de la machine par des équations d'état, elle utilise les outils d'automatique pour la synthèse des blocs d'observation. Le schéma de principe d'un observateur d'état est donné par la figure 1.3. Plusieurs catégories d'observateur utilisant cette approche ont été proposées dans la littérature dont on peut citer les suivantes :

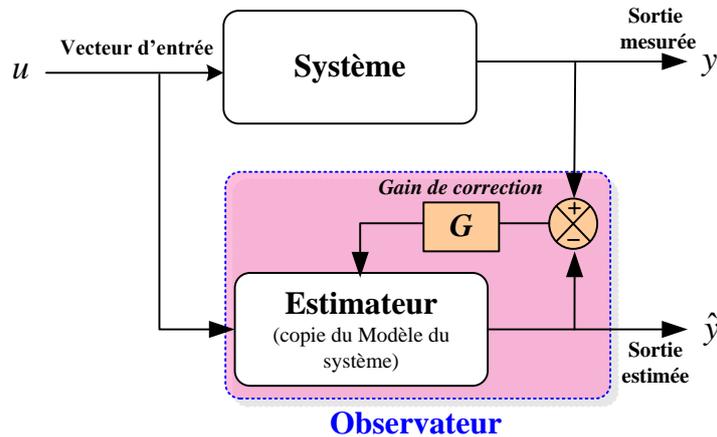


Figure 1.3 : Schéma de principe d'un observateur à base de modèle.

- **Estimateur MRAS** : le MRAS (Model Reference Adaptatif System) est basé sur la comparaison de deux estimateurs de deux structures différentes, le premier est appelé modèle de référence et n'introduit pas la vitesse de la machine alors que le deuxième est exprimé en fonction de la vitesse et appelé modèle ajustable. L'erreur entre ces

deux modèles pilote un mécanisme d'adaptation qui génère la vitesse estimée (figure 1.4).

Le MRAS le plus utilisé est celui qui est basé sur les deux modèles de tension et de courant pour l'estimation des flux, mais cette représentation souffre d'un problème d'intégral pur dans le modèle de référence. Pour pallier ce problème, plusieurs solutions ont été proposées en utilisant un filtre passe-bas [Holt-1993], [Ilas-1994], [Jeml-1998], [Jarr-2000]. Un MRAS basé sur l'estimation de l'énergie réactive ou en utilisant des modèles purement basés sur les courants statoriques [Orlo-2010]. Récemment, diverses techniques d'observation, à savoir, le sliding mode, le réseau de neurone, et la logique floue ont été introduites dans l'estimateur MRAS pour soit remplacer le modèle de référence ou la boucle d'adaptation afin d'améliorer les performances de fonctionnement de la machine à basse vitesse [Cirr-2005], [Gado-2009], [Zhao 2014].

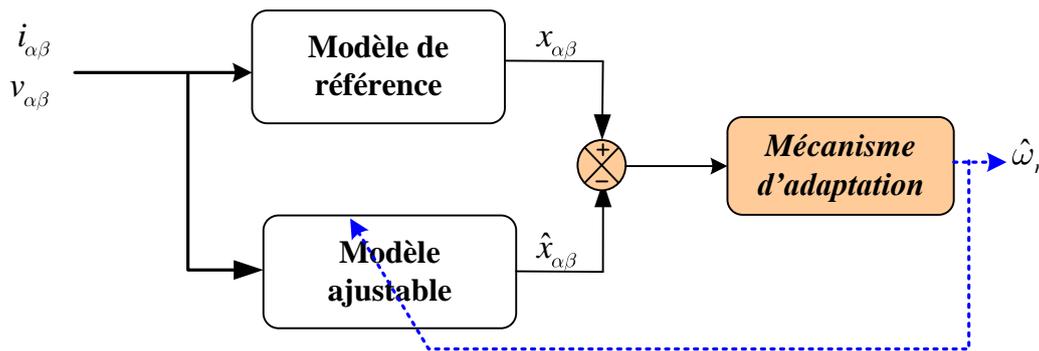


Figure 1.4 : Schéma de principe du MRAS.

- Filtre de Kalman** : c'est un observateur pour les systèmes linéaires stochastiques et déterministes. Il existe aussi une version étendue connue par "filtre de Kalman étendu" ou en anglo-saxon "Extended Kalman Filter" (EKF) pour les systèmes non linéaires. L'EKF est parmi les méthodes d'observation les plus populaires et largement utilisées pour l'estimation d'état des systèmes non linéaires. L'EKF a été largement étudié en vue de la commande sans capteur des machines asynchrones et synchrones [Youn-1994], [Kaux-2005], [Mena, 2007], [Zhen-2008], [Baru-2012], [Alon-2015], [Zerd-2017], [Bous-2005], [Khla-2012]. Dans [Also-2016], l'EKF est utilisé pour l'estimation de la vitesse et du flux dans un système de contrôle du couple direct, il a montré des résultats de bonnes performances à basse vitesse.

Dans [Yin-2017], une nouvelle méthode, pour l'estimation de la vitesse et du flux pour les moteurs asynchrone, basée sur l'EKF à modèle multiple avec la chaîne de Markov (MC-MM-EKF) a été récemment proposée. Elle a pour but d'améliorer l'adaptabilité du modèle aux systèmes réels pour réduire l'erreur d'estimation de la vitesse. Egalement, dans [Zerd-2017], un EKF optimisé a été utilisé pour l'estimation de la vitesse et le couple de charge dans une structure de contrôle vectoriel sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone. Afin d'obtenir des estimations de hautes performances d'état de la machine, les matrices de covariance d'état et de bruit doivent être déterminées avec rigueur. L'algorithme EKF est optimisé par l'algorithme d'évolution différentielle (DEA) avec l'utilisation de différentes fonctions de fitness (fitness function). Une étude comparative a été réalisée afin de déterminer la meilleure fonction pour les applications du contrôle de mouvement. Malgré ces performances, l'EKF souffre toujours des contraintes liées à son implantation pratique sur des processeurs ou des microcontrôleurs peu puissants à cause du temps de calcul nécessaire pour l'exécution de l'algorithme.

- **Observateur par mode glissant :** Les observateurs par mode glissant (SMO) sont reconnus pour leur robustesse vis-à-vis des variations de paramètres de la machine. Ils sont largement utilisés en raison de leur convergence en un temps fini et de leur robustesse par rapport aux incertitudes [Utqi-1992], [Edwa-1998], [Perr-2002]. La principale contrainte pour l'application industrielle de cette technique d'estimation est le problème de réticence ou en anglo-saxon « Chattering », caractérisée par des oscillations de hautes fréquences lorsque le mode glissant a eu lieu. Pour surmonter cette contrainte, plusieurs méthodes ont été proposées dont on peut citer celles basées sur la fonction de saturation ou la fonction hyperbole qui consistent généralement à remplacer la fonction discontinue “signe” par une approximation continue plus lisse. Les algorithmes glissants d'ordre supérieur constituent aussi une bonne solution permettant d'alléger le phénomène de chattering et de conserver les avantages du sliding mode [Solv-2010].

Grâce à leur simplicité d'implémentation, leur rejet de perturbations et leur forte robustesse [Viei-2014], différents schémas basés sur la théorie des modes glissants ont été utilisés pour le contrôle et l'observation dans des systèmes d'application très variés : [Saba-2011], [Rao-2009], [Utqi-1999], [Lasc-2009], [Rive-2012], [Yang-2013], [Utqi-1992], [Edwa-1998], [Perr-2002]. Ils ont été aussi largement étudiés en vue d'estimation

de la vitesse mécanique dans différentes applications basées sur des machines électriques [Zhan-2006], [Gha-2009], [Zaky-2009], [Solv-2001], [Viei-2014].

Dans [Zaky-2009], un algorithme d'estimation de vitesse basé sur un observateur de courant par mode glissant SMO qui combine le contrôle de la structure des variables, la stabilité de Lyapunov et les théories de l'hyperstabilité de Popov a été proposé. Pour améliorer les performances d'estimation dans des régimes de fonctionnement à très basse vitesse ou à vitesse nulle, un schéma d'identification de la résistance du stator basé sur les mêmes théories est également développé et utilisé en parallèle avec l'estimateur de vitesse. Un observateur sliding mode modifié avec un système d'identification en ligne d'inductance magnétisante est aussi présenté pour fonctionner dans la région de dé-fluxage.

Une autre technique a été aussi développée dans [Viei-2014] présente un observateur de vitesse du rotor d'une machine à induction basé sur une approche sliding mode et une estimation du courant magnétisant. La force électromotrice (EMF) de la machine est calculée à partir des courants et des tensions du stator. Les courants de magnétisation sont obtenus à partir de l'EMF. L'analyse de la stabilité est réalisée en utilisant l'approche de Lyapunov pour le régime continu et le régime discret.

- **Autres techniques :** Plusieurs autres techniques d'observation ont été aussi développées pour l'estimation d'état et la commande sans capteur de vitesse de la machine asynchrone dont nous pouvons citer : les observateurs interconnectés à grand gain et les observateurs adaptatifs interconnectés [Ghan-2008], [Trao-2008], [Trao-2009], les observateurs de Luenberger [Lee-2006], [Joui-2012] et les observateurs backstepping et Z-Type backstepping [Ghan-2007], [Mora-2015].

### 3. Défauts dans les onduleurs triphasés

#### 2.3. Structure de la chaîne de conversion d'énergie à base d'un onduleur triphasé

Notre système d'entraînement à vitesse variable, présenté par la figure 1.5, est constitué principalement d'une machine asynchrone triphasée associée à un onduleur de tension à trois bras. Le convertisseur électrique alimentant l'ensemble regroupe un pont redresseur à diodes suivi par un bloc de filtrage de type LC pour filtrer les harmoniques à haute fréquence. Le capteur de vitesse est remplacé par un capteur logiciel à base d'un observateur par mode glissant

qui utilise comme entrée les courants mesurés et les tensions statoriques fournies par la boucle de commande. L'onduleur est contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation : PWM), sa structure de base est donnée par la figure 1.5, elle est constituée de six interrupteurs bidirectionnels dont chaque interrupteur est composé d'un transistor monté en parallèle avec une diode de roue libre. Ces onduleurs utilisent généralement des interrupteurs de puissance à base des IGBTs (*Isolated Gate bipolar transistor*) qui associent les avantages des transistors MOSFET (fréquence de découpage importante) et ceux des transistors bipolaires (supporter des courants et des tensions très élevés).

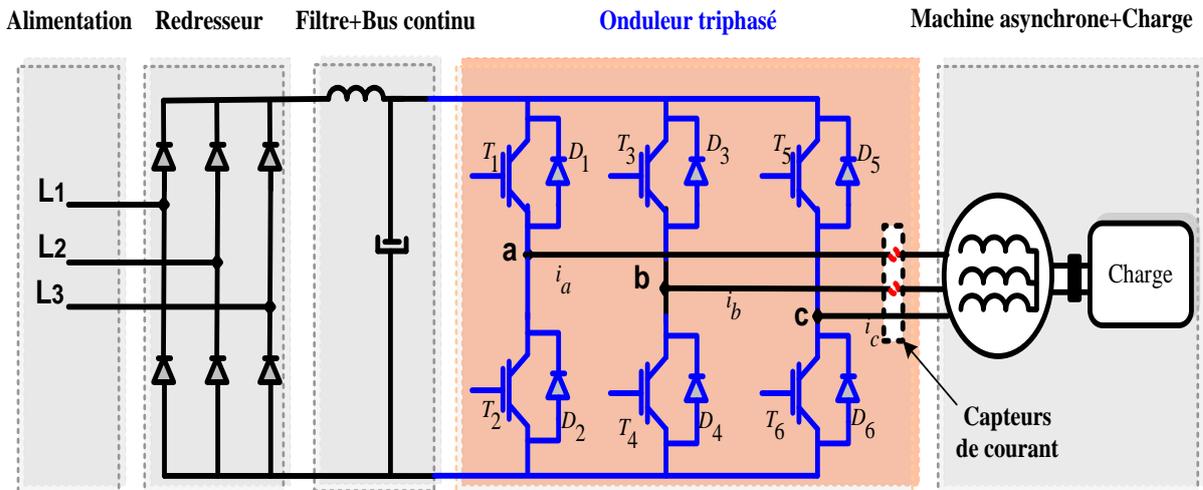


Figure 1.5 : Schéma de la chaîne de conversion d'énergie.

Les systèmes d'entraînement électrique sont soumis à des divers défauts dont les conséquences dépendent de manière significative de leurs emplacements [Thor-1995]. Un défaut un des composants des blocs constituant la chaîne de conversion d'énergie peut entraîner une perte partielle ou totale du contrôle de l'actionneur et des arrêts de maintenance non planifiés entraînant des pertes de production importantes. Dans d'autres situations, ces défauts peuvent provoquer des conséquences désastreuses et des dangers pour le personnel, les installations et l'environnement, en particulier lorsque les systèmes sont intégrés dans des installations pertinentes pour la sécurité, comme l'avionique, le transport, la santé, les réseaux électriques, la robotique ou les centrales nucléaires. Ainsi, il est primordial de surveiller le fonctionnement des systèmes et à réagir aux problèmes potentiels au bon moment afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité des processus. Le développement d'une surveillance fiable et des méthodes de détection de défauts rapides, ainsi que des stratégies de contrôle tolérantes aux pannes ont reçu une attention accrue à la fois dans les domaines de la recherche et de l'industrie.

Comme le montre le tableau 1.1, ces défauts peuvent être d'ordre électrique au niveau du moteur (coupe-circuit ou court-circuit du bobinage statorique, défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit) ou d'ordre mécaniques (excentricité, défauts de roulements) [Sing-2004], [Ceba-2012], ou encore au niveau de l'onduleur et des capteurs utilisés. Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement aux défauts qui peuvent survenir au niveau des éléments de puissance de l'onduleur de tension alimentant la machine asynchrone triphasée.

**Tableau 1.1 :** Classification des principales défaillances dans un système d'entraînement électrique à base d'une machine asynchrone.

Défaut au niveau de la machine	Défaut au niveau de l'onduleur	Défaut au niveau des capteurs
Défauts électriques <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Court-circuit du bobinage</li> <li>▪ Rupture de barres</li> </ul> Défauts mécaniques <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Excentricité</li> <li>▪ Défauts de roulements</li> <li>▪ Mouvement des enroulements et des tôles</li> </ul>	Composants de puissance <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Court-circuit</li> <li>▪ Circuit-ouvert</li> </ul>	Capteurs électriques <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Défaillance totale</li> <li>▪ Saturation</li> <li>▪ Bruit</li> <li>▪ Offset</li> </ul> Capteurs mécaniques <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Défaillance totale</li> <li>▪ Interruptions périodiques du signal.</li> <li>▪ Offset</li> </ul>

#### 2.4. Mode de défaillance des éléments de puissance dans un onduleur

Les entraînements électriques à vitesse variable à base d'une association machine-convertisseur fonctionnent souvent dans des conditions industrielles hostiles qui peuvent générer des dégradations totales ou partielles des performances de l'ensemble à cause de l'apparition des défaillances dans les différents sous-blocs de la chaîne de conversion d'énergie. Selon des études statistiques, parmi les différents types de défaillance dans ces applications, les défauts du convertisseur de puissance représentent un pourcentage assez important d'environ 80% [Orlo-2014], [Yang-2010], [Yang-2011].

La figure 1.6 montre que nombreux 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 1.6, nous constatons que les modules de puissances sont considérés comme les composants les plus sensibles aux défauts avec un pourcentage de 34% [Yeh-2007], [Wolf-2007], [Yang-2010], [Gopi-2015]. 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.

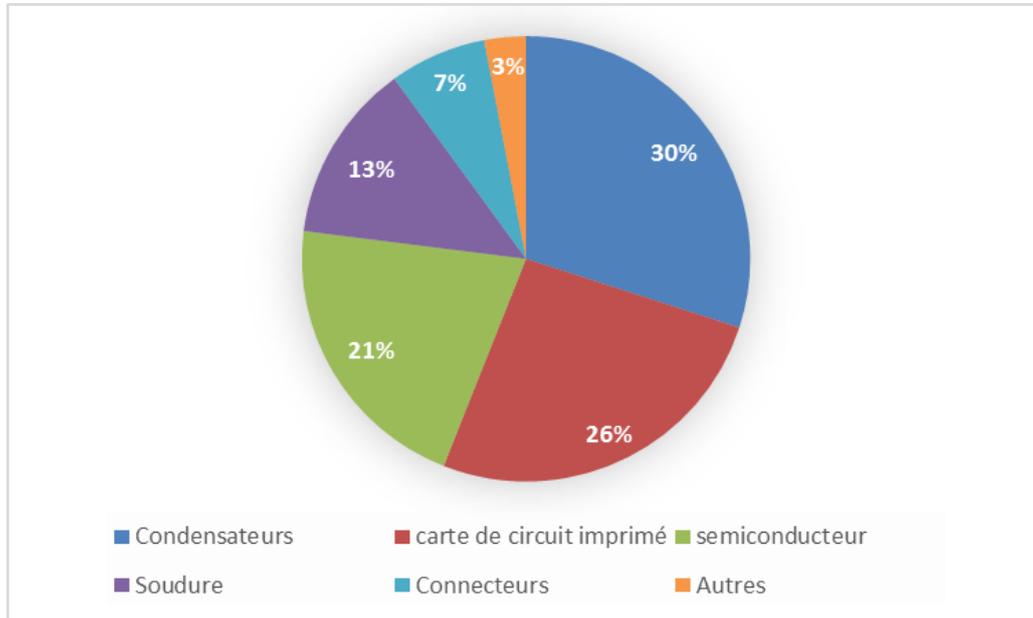


Figure 1.6 : Répartition des défaillances dans les convertisseurs de puissance [Wolf-2007].

### 3.2.1. Défaut de type court-circuit

Le défaut de type court-circuit d'un interrupteur apparaît quand l'un des deux interrupteurs reste continuellement à l'état passant. Le court-circuit se produit lorsque le deuxième interrupteur est à son tour commandé à la fermeture. Ce défaut se produit en raison d'une défaillance de la commande des transistors (défaillance du driver, défaillance de la carte de commande, problème de connectique entre la carte de commande et le driver) ou suite à une défaillance physique de la puce du silicium qui résulte d'un dépassement de la température et c'est le mode de défaillance le plus probable et le plus courant [Vall-2003].

Les défauts de court-circuit des interrupteurs de puissance sont difficiles à manipuler en raison de la soumission du composant endommagé à un fort courant, à une tension élevée et à des températures locales excessives. Dans l'absence d'un mode de protection, ce défaut peut se propager et endommager l'autre interrupteur du même bras dans un temps très court de l'ordre de quelques microsecondes [Vall-2003]. La période entre l'initiation du défaut et sa défaillance totale est très courte. Par conséquent, la plupart des méthodes de diagnostic des défauts de type court-circuit sont basées sur des circuits matériels pour le contrôle de la tension émetteur-collecteur du transistor ou pour le suivi du courant de la cellule.

### 3.2.2. Défaut de type circuit-ouvert

Un défaut simple de type interrupteur-ouvert ou circuit-ouvert se traduit généralement par une perte totale ou partielle du fonctionnement de l'un des IGBTs constituant le convertisseur statique, il se produit en raison d'une défaillance de grille ou une coupure d'un fil de liaison dans le transistor, cette coupure peut être causé par le cyclage thermique ou suite à un défaut de court-circuit [Lu-2009], [Mavi-2007]. Un courant de collecteur extrêmement élevé peut également provoquer des défauts d'interrupteur ouvert [Orlo-2014]. Le défaut d'ouverture d'IGBT se manifeste par la perte d'une alternance positive ou négative du courant de sortie de l'onduleur en fonction de l'emplacement du composant endommagé au niveau du bras défaillant (IGBT de l'étage inférieur ou de l'étage supérieur). Pour une dégradation simple d'un interrupteur de l'étage supérieur, la phase du moteur reste connectée seulement au potentiel négatif du bus continu par la diode antiparallèle de l'IGBT du niveau bas.

L'impact des défauts IGBTs sur les performances du système d'entraînement est étudié dans [Bazz-2010], le courant de la phase défectueuse s'annule et une augmentation de l'erreur de courant apparaît pour imposer à la modulante de rester saturée tout au long de l'alternance positive du courant de référence correspondant. Quand l'alternance du courant devient négative, l'erreur s'annule et le courant sera contrôlable. Les deux autres courants qui correspondent aux phases saines seront aussi déformés suite à ce défaut, cette déformation se manifeste par une augmentation de leurs amplitudes et ils ne deviennent plus parfaitement sinusoïdaux.

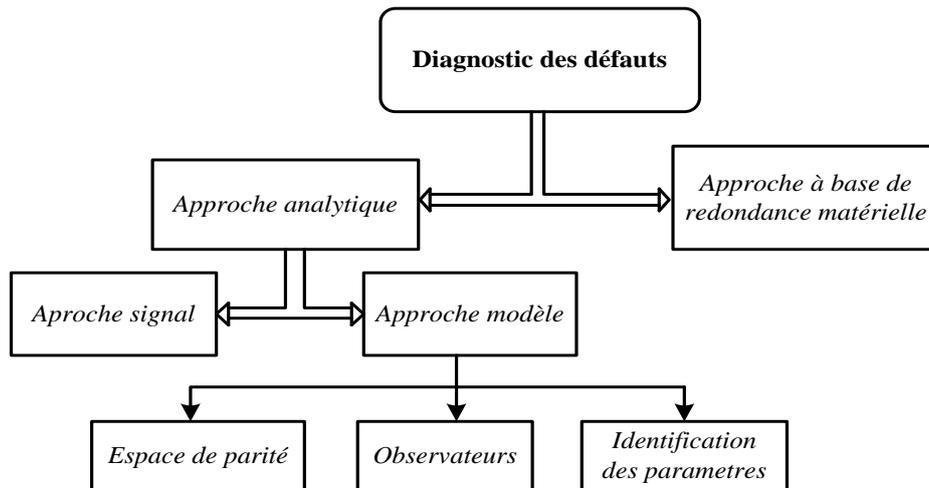
Cette distorsion importante des courants de phase se manifeste aussi sur le plan mécanique par l'apparition des vibrations sur l'arbre du moteur qui engendrent des oscillations au niveau de la vitesse mécanique mesurée. Ces vibrations sont les conséquences d'apparition des harmoniques dans les courants de référence qui engendrent des échauffements excessifs qui peuvent endommager le système d'entraînement électrique à vitesse variable. Pour un fonctionnement de longue durée du mode dégradé, ces vibrations vont conduire aux vieillissements accélérés des éléments mécaniques de la machine.

En résumé, les défaillances au niveau des commutateurs doivent être détectées et compensées indépendamment de leurs natures (court-circuit ou circuit ouvert), car en plus de la dégradation des performances du système, ils peuvent se propager et engendrer d'autres défaillances dans la chaîne de conversion d'énergie.

## 4. Diagnostic de défauts

### 4.1. Méthodes de diagnostic et classification

Comme nous avons mentionné précédemment, grâce aux développements rapides de l'électronique, de la technique informatique et de la technologie de l'information, les processus industriels modernes deviennent de plus en plus complexes. Ainsi, les problèmes de sécurité et de fiabilité révèlent une importance considérable vu que la présence d'une défaillance peut entraîner des conséquences désastreuses. Ainsi, il est indispensable de faire appel à des techniques de surveillances modernes combinant le diagnostic et la correction des défauts afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité des processus, de minimiser les coûts de maintenance et de protéger l'installation dans les états critiques. De nombreuses techniques ont été proposées au cours des dernières décennies pour le diagnostic des défauts. La plupart d'entre elles peuvent être classées en trois principales catégories (figure 1.7) : les méthodes basées sur la redondance matérielle, les méthodes basées sur l'approche signal et les méthodes basées sur l'approche modèle (redondance analytique).



**Figure 1.7:** Classification des méthodes de diagnostic des défauts.

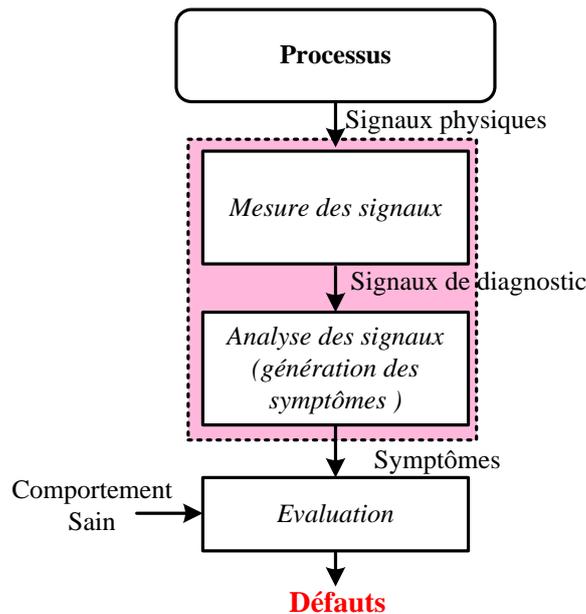
- **Approche à base de redondance matérielle**

Le concept de cette approche consiste à reconstruire un second processus redondant en utilisant les composants matériels utilisés pour le processus principal concerné par le diagnostic [Ding-2013]. La détection et l'identification des défauts peuvent être obtenues à partir d'une comparaison continue entre les deux sorties du processus à surveiller et de son correspondant redondant. Cette approche permet une meilleure fiabilité et peut ainsi être appliquée dans des

applications dont la sécurité est fortement indispensable. Cependant, les coûts économiquement élevés des composants matériels redondants limitent leurs applications.

- **Approche signal**

Le concept général de la procédure de diagnostic basée sur l'approche signal est donné par la figure 1.8. Ces méthodes s'appuient sur la collecte et l'analyse des données mesurables du processus pour réaliser la détection et l'identification des défauts, elles sont parfois appelées par les méthodes directes. Dans les solutions les plus simples, il suffit juste de vérifier les limites de crédibilité ou les valeurs limites (seuils) de ces données. Dans d'autres solutions et selon le type des signaux à analyser (périodiques, non stationnaires, stochastiques), le diagnostic des défauts est basé sur des méthodes d'analyse de signaux plus avancées telles que : l'analyse de corrélation, l'analyse de Fourier, l'analyse des paramètres stochastiques, l'analyse spectrale, analyse d'ondelettes [Chow-2000], [Rier-2015], [Sing-2004], [Bouz-2011], [Iser-2011], [Gao-2015].

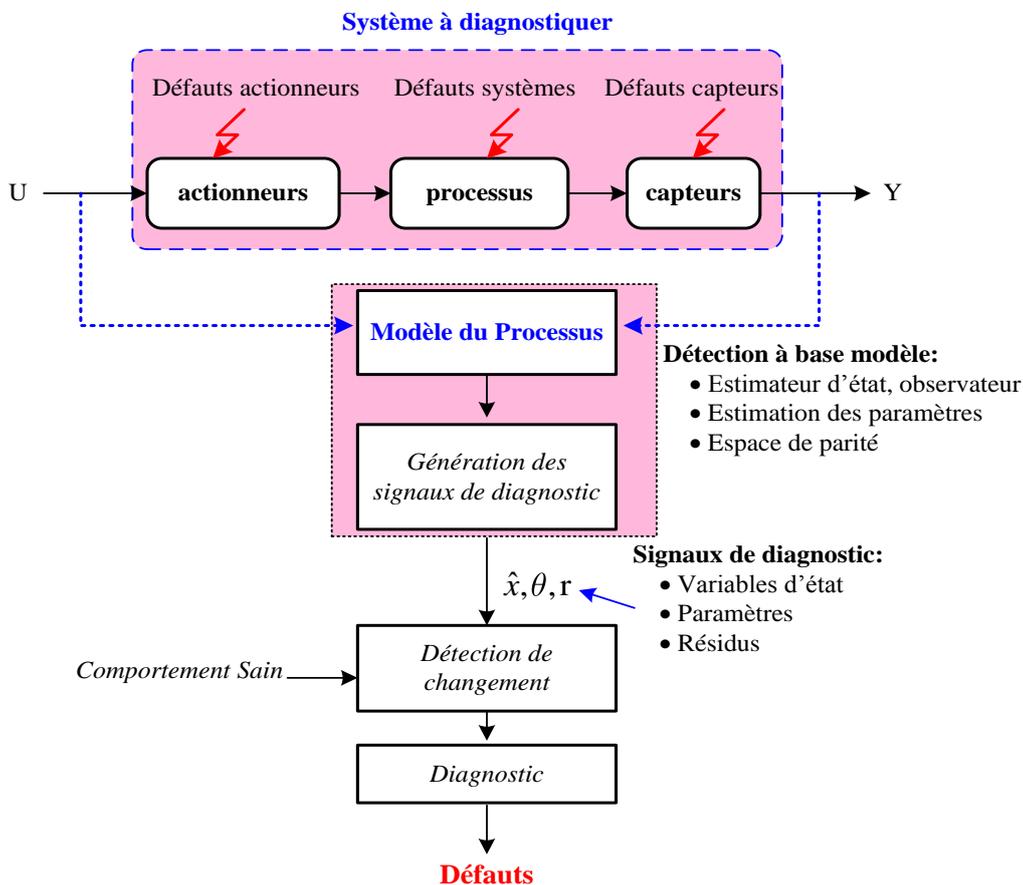


**Figure 1.8 :** Schéma de principe général de diagnostic à base d'une approche signal.

Un intérêt croissant a été aussi porté pour l'application des méthodes d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones, la logique floue et les réseaux neuro-floues dans le but d'améliorer le processus de surveillance et de diagnostic des défauts et augmenter sa fiabilité [Khan-2004], [Su 2007], [Kowa-2003]. L'inconvénient majeur de ces méthodes se situe au niveau de la nécessité d'un temps de diagnostic relativement long et un processus de calcul complexe et excessif.

• **Approche modèle**

Les approches de diagnostic basées sur des modèles ont été utilisées pour la première fois avec les systèmes linéaires dans les années 70 [Bear-1971], [Jone-1973], elles ont été utilisées comme des méthodologies principales dans le domaine des systèmes de commande automatique durant les quatre dernières décennies [Mang-1998], [Chen-1999], [Ding-2013], [Gao-2015]. Elles sont connues souvent par " les approches à base de redondances analytiques" car, contrairement à la redondance matérielle, un modèle redondant logiciel est développé pour fonctionner en parallèle avec le processus à surveiller. Ces approches peuvent être classées en trois types : les approches basées sur l'observateur, les approches basées sur l'identification des paramètres et les approches basées sur l'espace de parité [Touh-2007]. La structure de base de diagnostic à base d'une approche modèle est donnée par la figure 1.9.



**Figure 1.9:** Schéma de principe général de diagnostic à base d'une approche modèle [Iser-2011].

En se basant sur les signaux d'entrée et les signaux de sortie et selon le modèle mathématique développé, les méthodes de détection génèrent une estimation d'état du système ou une estimation des paramètres ou des résidus pour les employer comme des signaux pour le diagnostic. Ces signaux sont comparés à leurs correspondants normaux (variables nominales)

pour détecter le changement entre eux [Iser-2011], [Gao-2015]. Ce changement est utilisé comme signature pour le diagnostic de la panne.

Dans le cas le plus simple, le signal de diagnostic est calculé comme une différence (erreur) entre les signaux de sortie mesurés du système à surveiller et ceux obtenus à partir du modèle. Quand le système fonctionne normalement (système "sain"), cette différence oscille autour de zéro. Au contraire, quand le système est défectueux, cette valeur sera considérablement importante et permet ainsi de confirmer la présence du défaut. Cependant, les meilleurs résultats sont obtenus pour les modèles de processus dynamiques et les signaux de diagnostic générés en fonction des méthodes d'estimation d'état ou de paramètres qui peuvent contenir des symptômes de défaut [Kabz-2016].

Associées aux exigences élevées sur l'estimation des variables non mesurables dans les processus industriels et commerciaux, l'accent a été mis au cours des dernières décennies sur le développement de diverses techniques d'observation [Luen-1964], [O'Rei-1983]. Dans le domaine de diagnostic des pannes, les techniques basées sur les observateurs ont également constitué la forme la plus populaire des approches de diagnostic des défauts à base modèle et elles ont été largement étudiées ces dernières années [Ding-2014], [Saleh-2015], [Linl-2016].

## 4.2. Diagnostic de défauts de type circuit-ouvert des composants de puissance dans un convertisseur statique

L'impact d'un défaut de court-circuit est généralement destructif surtout avec les entraînements classiques couplés en étoiles et nécessite soit un onduleur de tension spécial avec deux transistors en série, soit des composants supplémentaires tels que les triacs ou une architecture spéciale des machines à enroulement ouverts (open-end windings drives) [Nguy-2016]. De ce fait, nous nous limitons dans cette partie à l'étude des défauts de type circuit-ouvert des IGBTs. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses méthodes ont été développées sur le sujet du diagnostic des défauts de type circuit-ouvert dans les associations onduleur- moteur électrique [Lu 2009], [Gao-2015], [Wu-2016], [Tab-2017]. Ces techniques peuvent être globalement classées en deux catégories : les approches à base signal et les approches à base modèle.

### 4.2.1. Approche signal

- *Méthodes basées sur les courants*

Les premiers travaux développés en utilisant les courants ou leurs dérivés ont été proposés par Mendes dans les années 90 [Mend-1999], la méthode utilisée est basée sur la technique

connue par : "Park's vector method ". La détection et la localisation des défauts d'ouverture des transistors défectueux sont réalisées en calculant la trajectoire et l'amplitude des courants de phase dans le référentiel lié au stator ou lié au champ tournant. Cette technique présente un inconvénient majeur puisqu'elle dépend de la charge. Afin de diminuer la dépendance de la charge et la sensibilité aux transitoires, différentes méthodes ont été proposées en se basant sur la méthode de la composante continue normalisée (Normalised DC Current Method & Modified-Normalised DC Current Method) [Abra-2003], [Roth-2004], [Roth-2005]. La différence entre ces deux méthodes est que la version modifiée utilise une manière réduite pour la localisation du composant défectueux. Une version plus simple "Simple Direct Current Method" a été aussi proposée par les mêmes auteurs en utilisant uniquement les valeurs moyennes des courants de phases de la machine pour la détection du défaut.

La technique " Park's vector method" a été appliquée avec succès dans [Dial-2005], [Zida-2008], [Camp-2013] pour le diagnostic des défauts dans l'onduleur triphasé de tension, cependant ces approches basées sur cette méthode nécessitent une reconnaissance de formes complexe et présente un problème lié à la difficulté de leurs implantations.

Plus récemment, une méthode de diagnostic des défauts basée sur les erreurs des courants de référence (residual values) a été proposée par Estima [Esti-2011], [Esti-2013], elle utilise les trois courants mesurés et leurs signaux de référence correspondant pour former les erreurs. Ensuite, les valeurs moyennes de ces erreurs sont utilisées pour former les variables de diagnostic. Ces variables sont comparées avec des seuils prédéfinis pour détecter les défauts simples et multiples d'ouverture d'IGBTs dans l'onduleur.

Une technique de diagnostic basée sur l'analyse de la topologie symétrique de l'onduleur qui peut être décrite par les résidus des fonctions auto-définies " self-defined function " a été proposée dans [Wu-2015]. Bien que cette méthode permette de détecter et localiser 21 type de défauts, elle utilise de nombreuses fonctions qui nécessitent un calcul itératif des valeurs moyennes, ce qui présente des complexités de la mise en œuvre pratique de l'algorithme qui exige plus d'espace mémoire et permettant aussi d'augmenter le temps de traitement. Plusieurs valeurs-seuil définies expérimentalement sont aussi nécessaires pour pouvoir détecter et localiser les composants endommagés.

- **Méthodes basées sur les tensions**

Afin d'améliorer le temps de détection des défauts, différentes approches basées sur les signaux de tensions (tensions des pôles, tensions de phase de la machine, la tension de neutre) ont été également proposées dans [Ribi-2003], [Kari-2008], [An-2011], [Trab-2012]. Une

technique de diagnostic des défauts du convertisseur de puissance en temps réel basée sur FPGA (Field-Programmable Gate Array) a été développée par Karimi [Kari-2008] pour les topologies des convertisseurs tolérants aux pannes à trois bras. Cette méthode peut détecter l'élément défectueux en moins de 10  $\mu$ s par l'analyse de l'erreur entre les tensions mesurées et celles estimées.

Afin de simplifier le circuit de détection et de minimiser le temps de diagnostic, une proposition basée sur la mesure des tensions des transistors est obtenue en utilisant des photo-coupleurs à grande vitesse [An-2011]. La méthode proposée est réalisée par l'analyse du modèle de fonction de commutation de l'onduleur dans des conditions saines et défectueuses. Les défauts de type circuit ouvert des transistors peuvent être détectés en mesurant la tension collecteur-émetteur de IGBT de l'étage inférieurs de chaque bras. Le système de diagnostic utilise un circuit matériel pour obtenir indirectement les tensions des commutateurs de puissance et pour éliminer la complexité des capteurs. La détection des IGBTs endommagés est obtenue avec un retard d'environ 3  $\mu$ s.

Une autre méthode basée aussi sur les signaux de commutation PWM et le niveau des tensions entre phases a été proposée [Trab-2012]. Le diagnostic des défauts circuit-ouvert des IGBTs est effectué par la détection du changement du niveau zéro de tension, la détection des défauts est également réalisée en moins d'une période de commutation (environ 200  $\mu$ s). Cette méthode nécessite deux capteurs de tension pour la mesure des tensions entre phase et un circuit analogique pour l'implantation temps réel de l'algorithme de diagnostic.

Toutes ces techniques ont permis d'obtenir de bonnes performances en terme de rapidité de détection des défauts, cependant leurs principales faiblesses résident dans la complexité de leur mise en œuvre et le coût élevé du processus de diagnostic qui nécessite soit des capteurs de tension ou des circuits supplémentaires ou les deux à la fois.

#### 4.2.2. Approche modèle

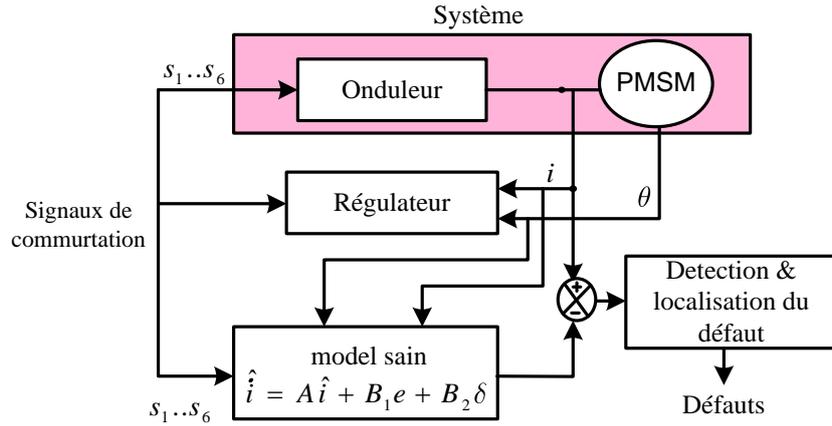
En ce qui concerne les approches de diagnostic à base de modèle, la détection des défauts est basée sur un modèle mathématique fonctionnant en parallèle avec le système. Les variables de diagnostic sont obtenues en comparant la similarité entre les signaux réels à la sortie du système et ceux estimés fournis par le modèle. Le diagnostic des défauts d'ouverture des IGBTs est basé sur l'approche modèle a attiré l'attention de plusieurs chercheurs ces dernières années et présente toujours un sujet d'actualité grâce à la facilité de les intégrer dans les algorithmes de contrôle existants. Plusieurs approches utilisant ce concept ont été développées récemment [Jung-2013], [Shao-2013], [Sale-2015], [Maam-2016], [Camp-2011], [Jlas-2017].

Dans [Camp-2011], les auteurs ont proposé un observateur non linéaire pour l'estimation des flux rotoriques et des courants statoriques dans le repère tournant  $(d, q)$ . La détection des défauts circuit ouvert des IGBTs est effectuée par une évaluation directe des résidus entre les courants statoriques mesurés et ceux estimés. L'approche proposée s'avère être indépendante de la charge et ne nécessite pas de circuit supplémentaire. Il est important de souligner ici que cette technique basée sur l'observateur non linéaire est valable seulement avec les configurations de commande avec capteur de vitesse. Si une configuration sans capteur de vitesse (sensorless) est considérée, il est impossible d'obtenir des sous-systèmes découplés des perturbations. En conséquence, les défauts simultanés ne peuvent plus être isolés [Camp-2011].

Une autre approche de diagnostic basée sur les tensions estimées a été proposée par [Frei-2013]. Cette méthode utilise un observateur de tension et utilise des valeurs moyennes d'erreurs de tensions normalisées entre les références et les tensions observées pour obtenir des informations sur le défaut. Toujours dans le même contexte d'éliminer l'utilisation des capteurs de tensions ou des circuits analogiques supplémentaires, une technique à base d'un système adaptatif de référence du modèle est adoptée pour diagnostiquer les défauts circuit-ouvert dans les onduleurs triphasés alimentant des machines synchrones à aimant permanent [Jung-2013]. Un observateur adaptatif pour la détection de distorsion de tension est utilisé pour le diagnostic des défauts. La méthode proposée peut détecter le défaut en moins de 1 ms et elle ne nécessite pas des capteurs supplémentaires.

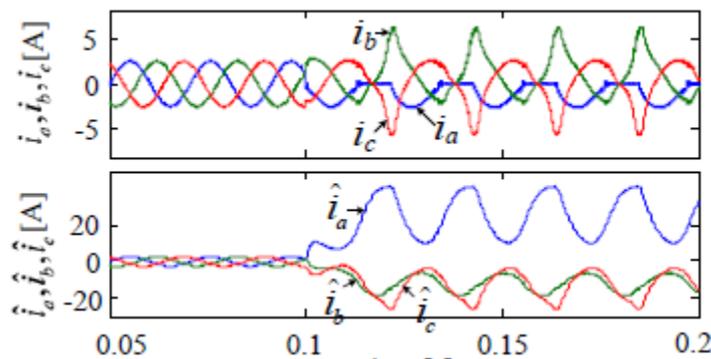
Dans le but d'éliminer les effets de variation de la charge, une méthode de diagnostic basé sur le vecteur résiduel de courant (Current Residual Vector CRV) a été proposée pour détecter les défauts d'ouverture d'IGBTs dans des systèmes d'entraînement à base d'un moteur synchrone à aimant permanent [An-2015]. Comme le montre la figure 1.10, le système d'entraînement est représenté par un système hybride (HS) regroupant les signaux de commutation discrets et les variables d'état continues de la machine (les courants statoriques).

Pour analyser les modes de fonctionnement du système, un modèle d'estimation mixte dynamique-logique (mixed logical dynamic MDL) du système d'entraînement est conçu pour estimer les courants statoriques du moteur. Le schéma de diagnostic des défauts proposé est construit sur la base de ce modèle d'estimation sain qui fonctionne en parallèle avec le système.



**Figure 1.10:** Principe de diagnostic de défaut à base de CRV.

Lorsqu'un défaut de circuit ouvert se produit, le CRV entre l'estimateur et le système réel fournit la phase et l'amplitude des erreurs qui seront utilisées comme des variables de diagnostic pour la détection du défaut. La figure 1.11 montre la dynamique des courants mesurés et ceux estimés suite à l'apparition d'un défaut dans l'IGBT de l'étage supérieur du premier bras de l'onduleur. En examinant la dynamique du courant estimé du bras défectueux et des deux autres courants qui correspondent aux bras sains, on remarque qu'une évaluation directe des amplitudes des erreurs (erreur entre les courants réels et ceux estimés) permet la détection du bras défaillant mais avec un temps de retard important. Pour surmonter ces limitations et augmenter la fiabilité et la robustesse de la méthode de diagnostic, l'auteur a proposé d'utiliser deux critères : L'amplitude de CRV pour signaler la présence d'un défaut dans l'onduleur et les courants de phases pour la localisation du transistor endommagé.



**Figure 1.11:** Dynamique des courants mesurés et ceux estimés lors de l'apparition d'un défaut au niveau de l'IGBT de l'étage supérieur du premier bras [An-2015].

Bien que cette méthode basée sur un estimateur d'état du système ne nécessite pas des capteurs supplémentaires pour la détection et la localisation des défauts, elle présente l'inconvénient d'être sensible aux légères variations paramétriques du système.

Les observateurs par modes glissants sont caractérisés par leur bonne robustesse contre les incertitudes du système et les perturbations externes, ce qui permet de résoudre d'une manière robuste les problèmes de diagnostic et de la commande tolérante aux défauts des systèmes non linéaires [Edwa-2000], [Chen-2007], [Yan-2008]. Pour la détection et l'identification des défauts d'ouverture d'IGBTs dans un convertisseur statique, une technique de diagnostic basée sur un observateur par mode glissant a été proposée par Salehifar [Sale-2015]. L'indice de détection des défauts est défini par la mesure de similarité entre les courants réels de chaque phase de la machine et les courants estimés à l'aide du facteur de corrélation croisée. Dans le but d'avoir un modèle d'observation idéal pour le diagnostic, un estimateur a été aussi développé pour estimer les paramètres de la machine. Ces paramètres seront utilisés par la suite pour la conception de l'observateur mode glissant utilisé pour le diagnostic. Cette méthode a présenté de bonnes performances vis-à-vis des variations transitoires de la vitesse et de la charge.

## 5. Synthèse sur l'état de l'art

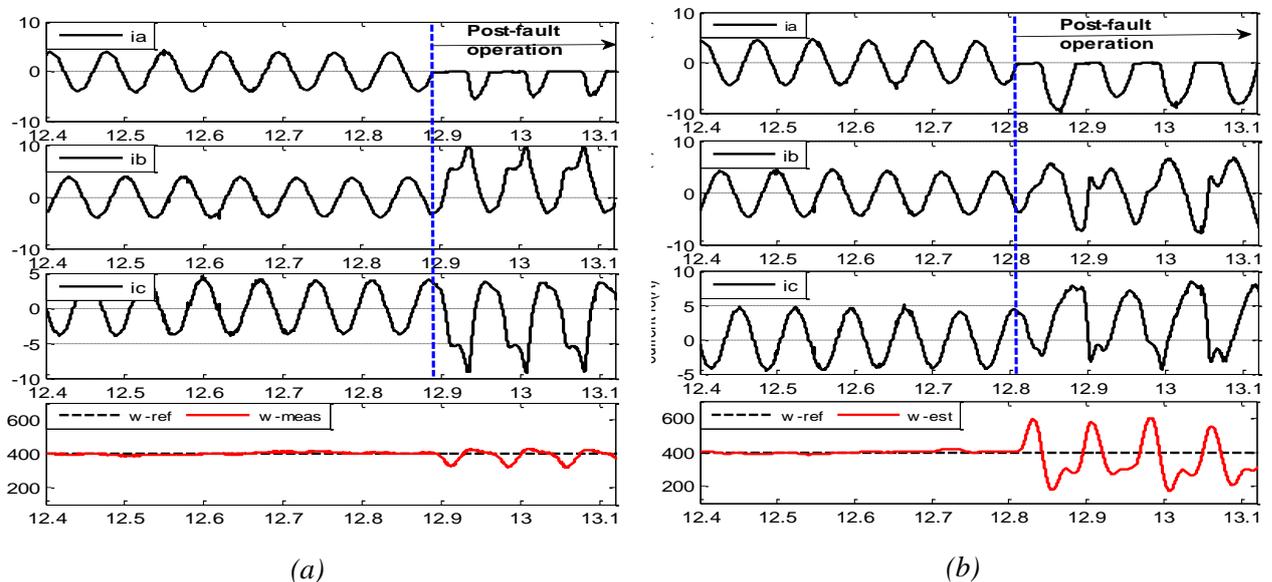
### 5.1. Particularités de fonctionnement des structures sans capteur en mode dégradé

Bien que les capteurs logiciels (observateurs) constituent un atout permettant de résoudre plusieurs problèmes provoqués par la présence d'un capteur mécanique dans l'environnement industriel (des problèmes d'encombrement, de sensibilité aux bruits et aux vibrations mécaniques, de maintenance etc.), la majorité d'entre eux sont également soumis à des difficultés liées à la conception de leurs modèles d'estimation qui est généralement basée sur des hypothèses simplificatrices. Ces observateurs présentent aussi une copie du modèle du système réel qui est constitué dans des conditions de fonctionnement en mode sain (en absence de défaut). En présence d'un défaut, certains types de ces observateurs présentent une erreur d'estimation considérable entre les grandeurs mesurées et celles estimées. Cette erreur est généralement connue par le terme résidu et elle est très utilisée pour la détection et l'identification de l'élément endommagé. Cependant, dans le cas où ces observateurs sont utilisés en boucle fermée avec le bloc de régulation, la présence de cette erreur d'estimation va affecter l'algorithme de commande et entraîner des dégradations significatives dans le système entier.

Nous nous limitons maintenant dans notre cas de fonctionnement à un onduleur triphasé alimentant une machine asynchrone contrôlée en mode sensorless (sans capteur mécanique de

vitesse). La figure 1.12 présente une comparaison du comportement de la dynamique expérimentale du système dans le cas de fonctionnement avec et sans capteur mécanique de vitesse de la machine et en mode dégradé. Le défaut est appliqué au niveau de l'IGBT  $T_1$  du premier bras à l'instant  $t=12.898s$ . Sur cette figure nous avons tracé les courants statoriques mesurés de la machine et la vitesse rotorique mesurée et estimée.

En mode de fonctionnement sans défaut, les courants mesurés dans les deux essais présentent une dynamique similaire, la vitesse mesurée et estimée sont toutes les deux maintenues à leur grandeur de référence. Après l'application du défaut, le régime dégradé se manifeste par l'annulation de l'alternance positive du courant  $i_a$  dans les deux cas de fonctionnement alors que des déformations importantes sont enregistrées au niveau des courants statoriques correspondants au cas sans capteur de vitesse. La vitesse estimée présente aussi des ondulations importantes par rapport à celles de la vitesse mesurée. Ceci nous renseigne sur l'instabilité de fonctionnement du système contrôlé en mode sensorless à cause des fortes ondulations de la vitesse estimée qui seront injectées par la suite dans la boucle de régulation et vont créer des erreurs qui s'accumulent dans la boucle d'observation. Ces erreurs contribueront à la dégradation des performances de la commande et à la divergence ou l'arrêt total de la machine si elle continue à fonctionner en présence du défaut.



**Figure 1.12:** Comportement du moteur asynchrone en mode dégradé : (a) avec capteur de vitesse. (b) avec capteur logiciel "observateur".

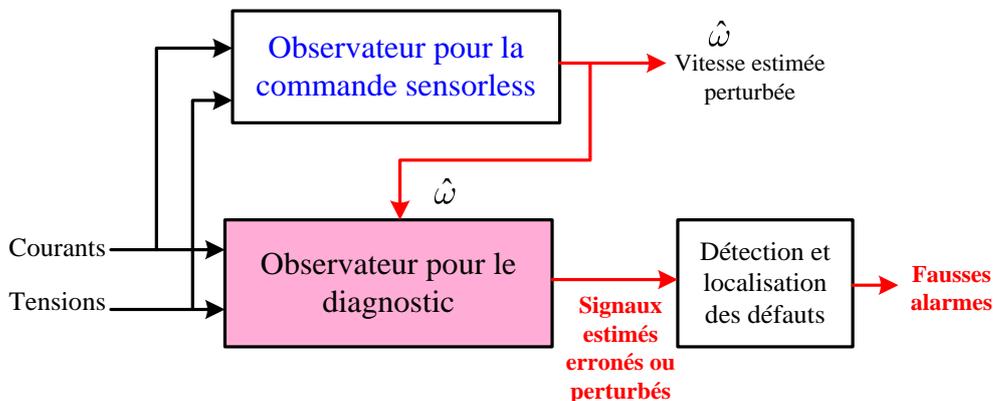
## 5.2. Limitations des techniques classiques de diagnostic

La majorité des méthodes de diagnostic développées dans la littérature concerne les systèmes d'entraînement électriques classiques où la vitesse mécanique de la machine est fournie par un

capteur de vitesse que ce soit pour un fonctionnement sain ou défectueux. En ce qui concerne maintenant l'étape de diagnostic des défauts, la vitesse du rotor mesurée est utilisée pour le diagnostic en temps réel des défauts dans plusieurs méthodes de diagnostic [Sles-2009], [Esti-2013], [Trab-2017]. Elle est également utilisée comme entrée au bloc d'observation (pour les méthodes de diagnostic à base d'un observateur) afin d'estimer les courants de phases et générer les résidus nécessaires pour le diagnostic [Sale-2015], [Jlas-2017].

Dans le cas d'une commande sans capteur mécanique, la mesure de la vitesse n'est plus disponible et elle est remplacée par la vitesse estimée fournie par l'observateur dédié pour la commande sensorless. L'utilisation de cette vitesse estimée et des courants estimés sans la prise en compte des perturbations dues à l'apparition d'un défaut peut engendrer des fausses alarmes ou des erreurs de calcul.

Si nous choisissons une solution basée sur deux observateurs, un pour le diagnostic et le deuxième pour la commande sensorless (figure 1.13), l'algorithme sera de plus en plus complexe et nécessite plus de temps de traitement ce qui pose des contraintes pour sa mise en œuvre expérimentale. D'un autre côté, ce schéma de diagnostic ne permet pas de s'échapper des problèmes de fausses alarmes et des perturbations, puisque l'observateur destiné pour le diagnostic aura comme entrées les signaux estimés (issus de l'observateur de contrôle sensorless) qui sont affectés par la présence du défaut onduleur.



**Figure 1.13 :** Diagnostic d'un système sensorless : Schéma de diagnostic à base de deux modèles pour le diagnostic et la commande sensorless.

Pour notre contribution, on propose de résoudre ce problème selon deux méthodologies avec minimisation de la complexité de l'algorithme pour faciliter son implantation pratique :

- La première méthodologie consiste à utiliser une technique à base du modèle pour à la fois le diagnostic et la commande sensorless. Les dynamiques modifiées des signaux

mesurés et estimés doivent être pris en compte pour la conception d'un algorithme robuste pour la détection et l'identification des défauts d'ouverture d'IGBTs.

- La deuxième méthodologie consiste à chercher des techniques d'estimation permettant une bonne estimation d'état du système en mode dégradé dans le but de maintenir la vitesse de la machine et d'assurer sa disponibilité en présence de défauts afin de pouvoir appliquer une stratégie de commande tolérante dans les meilleurs délais et les meilleures conditions de fonctionnement.

## 6. Conclusion

Avant le diagnostic des défauts simples et multiples dans un onduleur de tension triphasé alimentant une machine asynchrone sans capteur mécanique, un état de l'art sur les différentes techniques d'observation en vue de la commande sensorless des machines à courant alternatif a été tout d'abord présenté. Ensuite, nous avons présenté les principaux défauts dans une chaîne de conversion d'énergie et plus particulièrement les défauts des IGBTs. La deuxième partie traite la classification des différentes stratégies de diagnostic des défauts en générale. Une attention particulière a été accordée aux différentes stratégies de diagnostic développées dans la littérature pour la détection et l'identification des défauts de type circuit-ouvert des composants de puissance. Les spécificités qui caractérisent chaque méthode en termes de robustesse, de rapidité de détection et des contraintes de mise en œuvre pratique ont été aussi discutées.

La sensibilité des observateurs vis-à-vis de l'apparition des défauts ainsi que la dégradation des performances du système commandé sans capteur mécanique nous ont permis de dégager deux méthodologies à adopter. En premier lieu, la proposition d'une technique de diagnostic des défauts simples et multiples d'ouverture d'IGBTs dans l'onduleur, et en second lieu, la recherche des techniques d'observation permettant l'amélioration des performances de fonctionnement du système en mode dégradé.