

Avion Plus Electrique

Dans les avions et les lanceurs spatiaux de dernière génération, les équipements électroniques se répandent de plus en plus (Figure 1), principalement du fait de l'évolution de l'électronique de puissance [1]. Le rendement et la densité de puissance (W/kg) des convertisseurs ont en effet augmenté de façon conséquente au cours des dernières années. Ces deux facteurs impactent directement sur les poids des équipements électroniques, qui représente un facteur critique [1], [2]. En effet, le poids est directement lié à la consommation de carburant, un problème autant économique qu'environnemental.

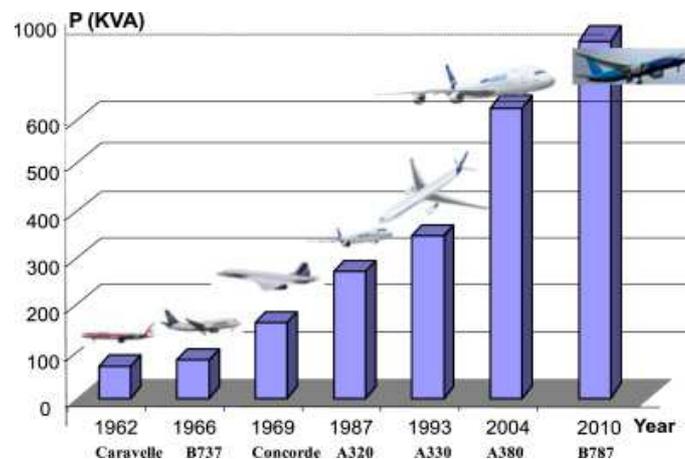


Figure 1: Evolution de la puissance électrique dans les avions commercialisés [3].

En utilisant des arguments économiques, techniques et environnementaux, des études ont été initiées pour remplacer des équipements mécaniques, hydrauliques ou autres par des analogues électriques. A partir de ces études, des concepts comme l' « Avion Tout Electrique » (AEA – *All Electric Aircraft*) [1], [5]-[8] et l' « Avion Plus Electrique » (MEA – *More Electric Aircraft*) [1]-[3], [9]-[20] ont été créés afin de formaliser l'étude et réaliser la transition vers les nouvelles technologies du domaine aéronautique. Le programme européen de financement à la recherche CleanSky [20] a été également fondé en accord avec les plus grandes compagnies du domaine, comme Airbus, Safran, Thales et Dassault Aviation. Dans le domaine aérospatial, la même tendance est observée, mais de façon moins médiatisée. Le trafic aérospatial ne présente pas le même flux que le transport aérien, les émissions de gaz à effet de serre sont moindres et donc l'aspect environnemental entre moins en ligne de compte.

Plusieurs avantages justifient l'augmentation d'équipements électroniques au sein de l'avion ou de la fusée. Economiquement parlant, la réduction du poids de l'appareil et l'optimisation de l'énergie embarquée peuvent être atteintes grâce à une mutualisation de l'énergie électrique [3], [11]. D'un point de vue technique, la robustesse et la souplesse par rapport à d'autres types d'énergie comme l'hydraulique, peut se traduire par une réduction de maintenance et plus de souplesse lors d'assemblage de l'avion [2], [12]. La réduction de la consommation de carburant est également mise en avant par son apport à l'environnement et le combat contre le réchauffement climatique.

Ces deux domaines sont soumis à des normes de sécurité très strictes. Une simple défaillance de composant ne doit pas amener à une perte de l’appareil qui engendrerait des pertes financières et/ou humaines, ce dernier point concernant surtout le transport aérien de passager. Pour cela, la tolérance aux défaillances se présente comme indispensable pour un équipement dans les domaines aéronautique et aérospatial [10], [14]. La littérature présente de nombreuses structures qui répondent aux exigences dans ce domaine, des équipements redondants, un équipement qui peut remplacer entièrement un autre identique qui tombe en panne, jusqu’aux systèmes intrinsèquement tolérants aux défaillances, comme des machines polyphasées par exemple. L’enjeu est de trouver le compromis entre le respect aux normes de sécurité tout en gardant les avantages économiques et techniques de l’équipement électrique. Il peut ainsi paraître évident que, plus un système est lourd, plus la redondance est coûteuse. De même lorsque la fonctionnalité du système consiste à produire du mouvement et non à traiter de l’information, alors la redondance est complexe à mettre en place et à opérer.

Par ailleurs, avec la cohabitation de plusieurs machines électriques et onduleurs, un autre aspect devient une voie d’optimisation : la mutualisation des ressources. Premièrement, la mutualisation des sources d’énergie et de puissance électriques est naturellement implantée, puisque des batteries et des alternateurs sont dimensionnés en prenant en compte l’énergie et la puissance demandées par les équipements et leurs profils de fonctionnement hétérogènes. En second lieu, des structures plus complexes de systèmes d’entraînement onduleur-machine proposent une mutualisation également des composants électroniques, réduisant ainsi le poids et le coût d’achat du système, tout en assurant la fiabilité exigée.

Dans l’optique des avions plus électriques de demain, ce travail de thèse cherche des solutions innovantes de systèmes multi-machines et multi-convertisseurs qui rendent un système électrique attractif par sa performance, par son poids et par son coût, tout en respectant la fiabilité requise dans ces deux domaines.

L’ « **Avion Plus Electrique** » (**MEA** – More Electric Aircraft) est un concept qui cherche à remplacer les équipements mécaniques, pneumatiques et hydrauliques dans l’avion par des équipements similaires électriques. Le MEA diffère de l’ « **Avion Tout Electrique** » (**AEA** – All Electric Aircraft) du fait qu’il n’envisage que le remplacement de l’énergie secondaire de l’avion, c’est-à-dire remplacer l’énergie non-propulsive par de l’électrique.

La technologie développée jusqu’à présent ne permet pas de créer un avion à propulsion 100% électrique en échelle industrielle en raison de l’énorme poids supplémentaire dû à la batterie et à l’énergie nécessaire pour un vol entier. Dans ce domaine, les projets les plus avancés sont l’avion solaire « Solar Impulse 2 » [21] et l’ « Extra 330LE » [22]. Le premier a réalisé le très médiatisé tour du monde sans l’utilisation des carburants fossiles qui s’est fini au Caire en Juillet 2016. Le deuxième est un projet commun entre Siemens et Airbus. Cet avion a réalisé son premier vol de 20 minutes en public en Juillet 2016 en Allemagne. Bien que les deux projets soient de natures très différentes, ils mettent en évidence la contrainte du stockage d’énergie électrique. Pour cela, les deux avions sont de petite taille dans le sens où il n’y a que le pilote à l’intérieur.

Comme exemple de propulsion hybride, le « DA-36 E-Star 2 » [23] est un avion construit par Diamond Aircrafts et motorisé par Siemens et EADS qui a été présenté au Salon du Bourget en 2013. Cette motorisation est caractérisée comme hybride en série et se trouve déjà à sa deuxième génération d’entraînement intégré.

Quant à l’avion traditionnel de ligne, il présente une composition très hétérogène de sources d’énergie selon chaque application [1], [11]. La Figure 2 présente un avion traditionnel avant l’implémentation du concept MEA où les différentes sources d’énergie utilisées par chaque équipement sont définies par un code de couleur.

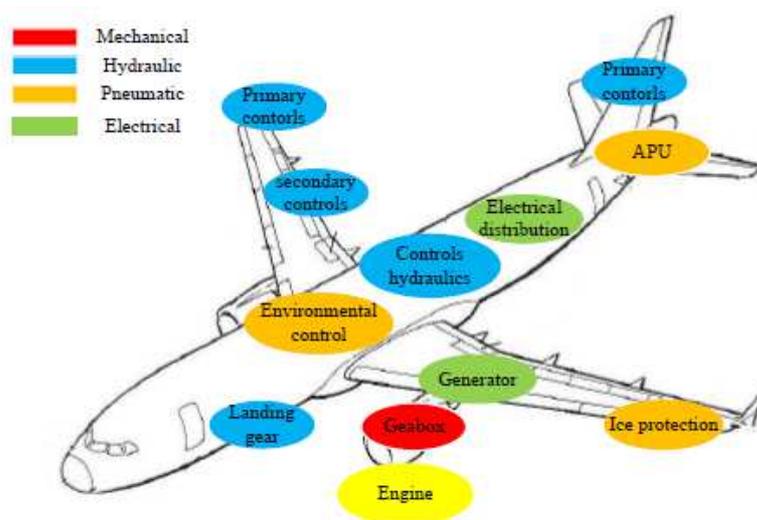


Figure 2 : Charges de l’avion avec un code couleur représentant la nature de l’énergie qui les alimente [14].

Dans la littérature [2], [3], [9], [11] -[18], différentes raisons ont été évoquées pour motiver le remplacement, avec des particularités en fonction de chaque type de source d’énergie.

Mécanique :

- **Exemples d’application** : dispositif de transmission mécanique au sein du générateur du réseau de bord 400Hz.
- **Remplaçants électriques** : un générateur à fréquence variable (**VFSG – Variable Frequency Starter Generator**) simplifie la transmission.
- **Avantages du remplacement** : réduction du poids et augmentation du rendement.
- **Inconvénients du remplacement** : les systèmes mécaniques sont structurellement plus fiables que l’électronique de puissance qui permet de générer l’énergie électrique à 400 Hz à partir d’une machine entraînée à vitesse variable.

Hydraulique :

- **Exemples d’application** : vérin pour le contrôle de vol et pour le train d’atterrissage.
- **Remplaçants électriques**: vérins hydrostatiques (**EHA – Electro-hydrostatic Actuators**) ou vérins électromécaniques (**EMA – Electromechanical Actuators**).
- **Avantages du remplacement** : moins de maintenance, moins de risque de fuite d’huile de nature corrosive et plus de flexibilité lors de l’assemblage de l’appareil.

- **Inconvénients du remplacement** : vérins hydrauliques ont une haute densité de force, ils ne risquent pas un blocage mécanique non-palliatif.

Pneumatique :

- **Exemples d’application** : contrôle de l’environnement au sein de l’appareil (**ECS** – *Environmental Control System*) et système de dégivrage des ailes (**WIPS** - *Wing Ice Protection System*).
- **Remplaçants électriques** : radiateurs électriques pour chauffer l’air et les ailes.
- **Avantages du remplacement** : Puisque l’air chaud est généré électriquement au lieu d’être récupéré au niveau du propulseur, ce dernier est libéré d’une contrainte qui pouvait entacher son rendement.
- **Inconvénients du remplacement** : Savoir-faire à acquérir.

En général :

- **Avantages du remplacement** : Mutualisation de l’énergie, réduisant ainsi le surdimensionnement des équipements qui doivent présenter une fiabilité élevée.
- **Inconvénients du remplacement** : La gestion de l’énergie électrique devient plus complexe.

Dans cette optique d’électrification, les grands constructeurs aéronautiques comme Airbus et Boeing et les équipementiers comme SAFRAN et Thales ont déjà commencé la transition énergétique sur les avions et équipements actuellement commercialisés.

Hormis les applications qui ont déjà été mentionnées, la motorisation électrique se présente aussi sur l’entraînement des trains d’atterrissage lorsque l’avion se trouve au sol. Classiquement, le roulage est généralement réalisé par les turbines de l’avion. Des projets comme le « Electric Green Taxiing System » [24] de SAFRAN et Honeywell et le « WheelTug » [25] motorisé par Chorus Motors proposent un entraînement électrique.

Dans le B787 [8], [11], [14], [17], [26], Boeing a réduit la boîte de transmission mécanique en remplaçant le générateur à fréquence fixe par un VFSG¹, et a remplacé l’ECS², qui contrôle la température et la pression d’air dans la cabine, et le WIPS, qui dégivre les ailes, en les remplaçant par des systèmes électriques analogues. Libéré de contraintes fonctionnelles, le rendement des propulseurs a augmenté.

L’A380 d’Airbus présente une combinaison de contrôleurs de vol électro-hydrostatique (vérin hydraulique alimenté par une pompe locale) avec actionneurs entièrement hydrauliques en redondance (Figure 3) [11], [14], [27]-[29].

¹ Sigle en anglais pour Générateur à Fréquence Variable.

² Sigle en anglais pour Système de contrôle de l’environnement au sein de l’appareil.

Afin de justifier un remplacement d’une application traditionnelle par l’électronique, des preuves de réduction de poids et/ou coût du système sont nécessaires pour des questions concurrentielles de l’industrie aéronautique et aérospatiale. Egalement, la démonstration de la conformité aux normes de fiabilité est nécessaire. Dans ce domaine, plusieurs études ont été menées sur la fiabilité des différents équipements électriques innovants pour les avions [13], [14], [29], [31], [35]-[37], [46] et des solutions tolérantes aux pannes [10], [14], [38], [30], [35], [42], [44], [46], [47]. Un autre obstacle est le savoir-faire traditionnel des grandes entreprises, sachant que des politiques gouvernementales, qui s’appuient sur des arguments environnementaux, et l’augmentation de la concurrence du marché aéronautique motivent les équipes de recherche et développement.

1.2. Application de référence pour la thèse

L’application étudiée plus en détail dans ce travail de thèse a été le **Contrôle de la Poussée Vectorielle (TVC - Trust Vector Control)**. Le TVC est le système qui incline la tuyère par rapport à l’axe de la fusée afin de générer un couple contrôlant la trajectoire de la fusée (Figure 4).

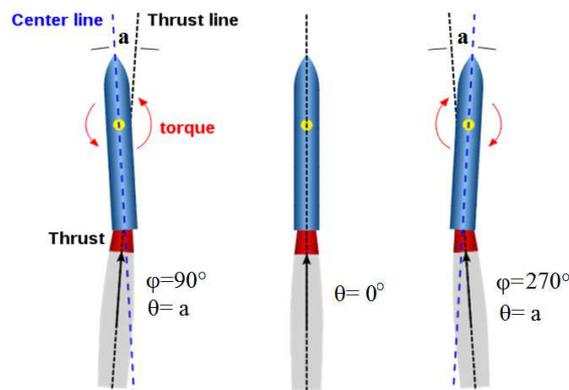


Figure 4: Schéma du lanceur spatial pour différents angles d’inclinaison du propulseur (vision frontale). Source : *Thales Alenia Space*.

Le TVC ici étudié est bidirectionnel, pouvant générer tout seul les mouvements de tangage et lacet. Pour cela, il est composé de deux vérins positionnés autour de la tuyère et déphasés de 90° (Figure 5). Cette disposition permet un contrôle presque découplé lors de l’inclinaison sur l’axe d’un des deux vérins. La combinaison du mouvement généré par les deux vérins permet un mouvement de la tuyère caractérisé par deux grandeurs : les angles φ et θ . L’angle θ , pouvant varier de 0° à 6°, est l’angle d’inclinaison entre l’axe de la poussée et l’axe d’attaque de la fusée. Le couple généré lors du guidage est proportionnel à cet angle. L’angle φ , pouvant varier de 0° à 360°, représente la direction de l’inclinaison.

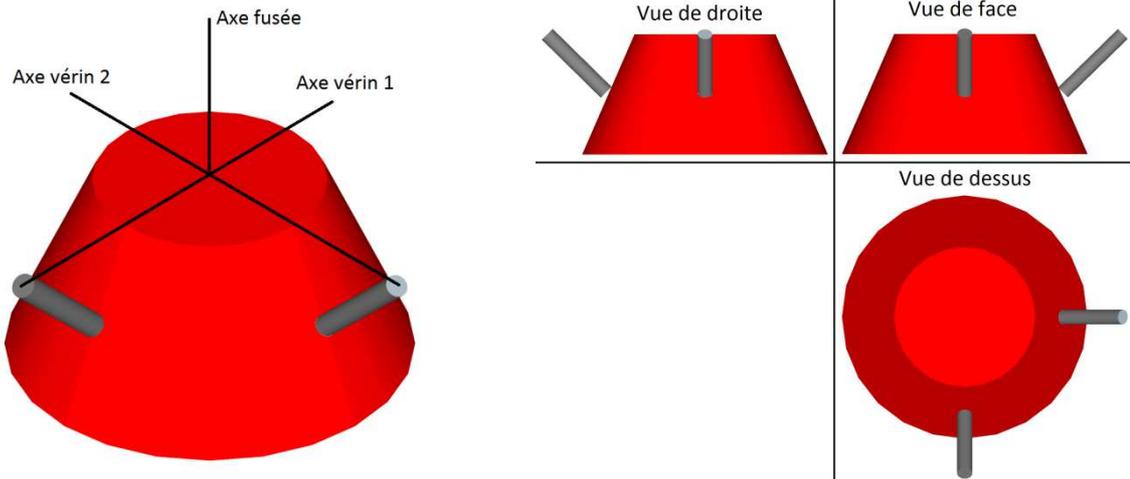


Figure 5: Schéma de la tuyère (en rouge) et des vérins (en gris).

Classiquement, ces vérins sont hydrauliques. Cependant, comme déjà mentionné dans la section 1.1, ce type de système est récemment remplacé par des systèmes électriques. Pour cette étude, des vérins électromécaniques sont envisagés pour éliminer totalement le réservoir hydraulique et les tuyaux. Les principales motivations sont l’élimination du risque de fuite, réduction du poids de l’ensemble et la récupération d’énergie du système électrique.

Dans cette étude, les machines électriques de chaque vérin sont contrôlées en vitesse, bien qu’en réalité elles soient contrôlées en position du vérin. Afin de représenter le fait qu’une machine fait plus d’effort que l’autre, dépendant de l’angle φ , les vitesses de référence sont exprimées par (Eq. 1) et (Eq. 2).

$$\Omega_{M1_{ref}} = K_{\Omega} \theta \cos(\varphi) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\Omega_{M2_{ref}} = K_{\Omega} \theta \sin(\varphi) \quad (\text{Eq. 2})$$

D’autres applications possèdent des profils semblables d’utilisation. Dans les avions, il est possible de mentionner les vérins du système de direction du train d’atterrissage [14], [29], [37], mais aussi d’autres vérins comme ceux d’extension et rétraction du train d’atterrissage et des contrôleurs de vol.

1.3. Concepts fondamentaux de fiabilité

Cette section s’intéresse à la définition de certaines notions de fiabilité qui sont nécessaires pour la bonne compréhension de la suite du document.

La **fiabilité** représente la faculté d’un élément ou d’un système de réaliser certaines fonctions dans des conditions définies et pendant une période de temps (T) donnée [48]-[51]. Les probabilités de fonctionnement ($R(t)$) et qu’un défaut survienne ($Q(t)$) sont représentées mathématiquement sur l’(Eq. 3).

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad (\text{Eq. 3})$$

La détermination de ces deux variables est acquise à partir du **taux de défaillance** ($\lambda(t)$) du produit et du composant. Celui-ci représente le nombre moyen de pannes dans le temps. La Figure 6 représente la courbe standard pour de $\lambda(t)$, connue comme la courbe « en baignoire ».

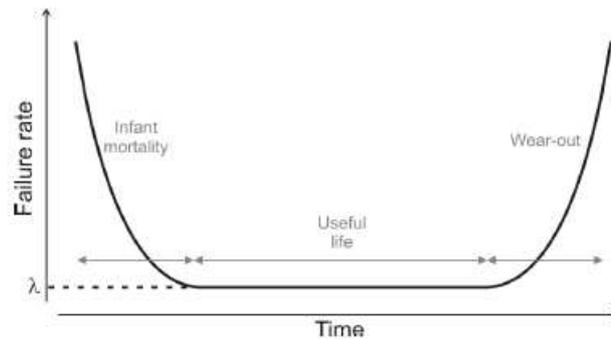


Figure 6: Courbe en baignoire [49].

Cette courbe représente les trois moments de la vie du produit : la période de **jeunesse** ou **déverminage**, où le produit tombe en panne au début de son fonctionnement pour possibles défauts de production. En deuxième temps, le taux de défaillance devient constant. Cette période est aussi connue comme la période de **vie utile** du produit. La valeur de taux de défaillance constant est régulièrement utilisée par les fabricants pour la spécification d’un produit en nombre de pannes par heure. Le dernier moment de la vie d’un produit est le **vieillessement**, où il peut éventuellement tomber en panne en usage normal.

La relation entre la fiabilité ($R(t)$) et le taux de défaillance constant (λ) est présentée par l’équation (Eq. 4). Cette relation ne prend pas en compte une panne lors de la période de jeunesse. Ainsi, un autre paramètre très utilisé par les fabricants est également défini, le **temps moyen pour tomber en panne (MTTF – Mean Time To Failure)** (Eq. 5).

$$R(t) \cong e^{-\lambda t} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Eq. 5})$$

Certaines applications peuvent encore prendre en compte d’autres paramètres : **temps moyen de récupération (MTTR – Mean Time To Recover)**, **temps moyen entre fautes (MTBF – Mean Time Between Faults)** et **temps moyen pour une deuxième faute (MUT – Mean UP Time)**. Ces autres paramètres ne sont pas expliqués en détail, mais la Figure 7 les présente sur un schéma.

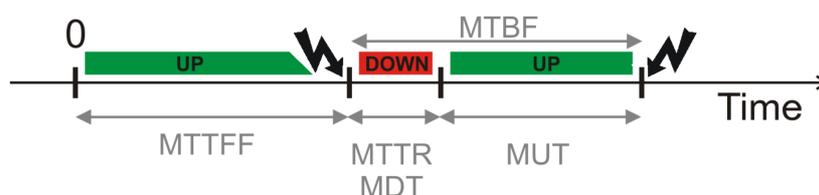


Figure 7: Schéma représentant les principaux paramètres de fiabilité [49].

Pour un composant, la courbe en baignoire et, en conséquence, les autres paramètres (MTTF et λ) sont définis à partir de tests réalisés par le fabricant. Cependant, dès qu’un élément fait partie d’un

système composé par plusieurs éléments, la fiabilité du système est calculée à partir de la fiabilité de chaque composant.

Pour un système, il est nécessaire de prendre en compte deux notions différentes de fiabilité : la fiabilité structurelle et la fiabilité fonctionnelle. La **fiabilité structurelle** concerne la probabilité qu’un défaut quelconque survienne, même s’il n’engendre pas l’arrêt total de la structure. La **fiabilité fonctionnelle** est liée à la disponibilité du système, en d’autres termes, elle est liée à la probabilité que le système puisse réaliser la fonction qui lui est dédiée [52].

La fiabilité fonctionnelle est identique à la fiabilité structurelle lorsque le système ne tolère aucune défaillance. La **tolérance aux défaillances** signifie la faculté d’un système de pouvoir fonctionner de façon acceptable après l’avènement d’un défaut. Lorsqu’un défaut pour lequel le système est tolérant survient, le système fonctionne en **mode dégradé**. Cependant, lorsqu’une **panne** survient, soit en mode normal, soit en mode dégradé, le fonctionnement du système est inacceptable.

Une structure simple à analyser est celle nommée **structure en série** (Figure 8). Cette structure consiste en un système où la panne d’un composant quelconque définit la panne du système entier. Le système n’est donc pas tolérant aux pannes : les fiabilités structurelle et fonctionnelle sont égales en valeur et calculée par (Eq. 6).

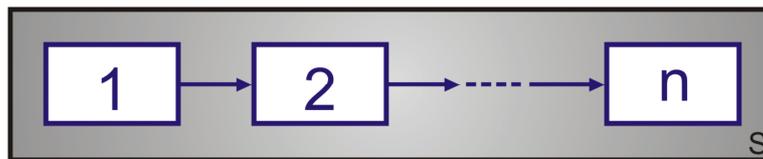


Figure 8: Structure en série à « n » éléments [49].

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \text{ ou } \lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{Eq. 6})$$

Puisque la fiabilité d’un élément est une valeur comprise entre 0 et 1, l’(Eq. 6) démontre que l’augmentation du nombre de composants réduit la fiabilité du système.

Par contre, les éléments redondants augmentent la fiabilité fonctionnelle du système. Cela s’explique par le fait que la redondance structurelle représente une **structure en parallèle** (Figure 9), où plus d’un élément réalise ou peut réaliser la même fonction. Ainsi, la perte des éléments redondants n’engendre pas une panne du système. Un exemple simple est celui de deux équipements identiques en parallèle, dans lequel le deuxième équipement est mis en fonctionnement lorsque le premier subit une panne.

L’ (Eq. 7) présente le calcul de la fiabilité fonctionnelle du système. Cependant, la fiabilité structurelle est toujours calculée comme l’ (Eq. 6). Dans ce cas, il est évident qu’en augmentant le nombre des composants, la fiabilité fonctionnelle est accrue. Si les éléments mis en parallèle partagent la même tâche, le stress sur chacun d’entre eux est réduit, augmentant ainsi le taux de fiabilité de chaque élément. En conséquence, il est possible que la fiabilité structurelle soit également plus élevée. En [53], cet aspect est présenté avec des valeurs numériques pour différentes topologies.

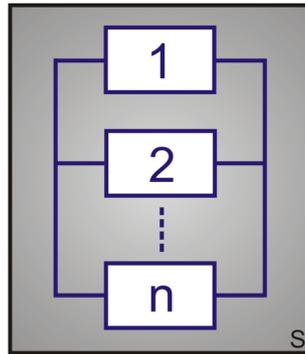


Figure 9: Structure en parallèle à « n » éléments [49].

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (\text{Eq. 7})$$

Cependant, la plupart des systèmes sont considérés comme des **systèmes complexes**, c'est-à-dire, ils sont un hybride de composants en série et en parallèle (Figure 10). Ainsi, le calcul de la fiabilité fonctionnelle du système devient plus complexe.

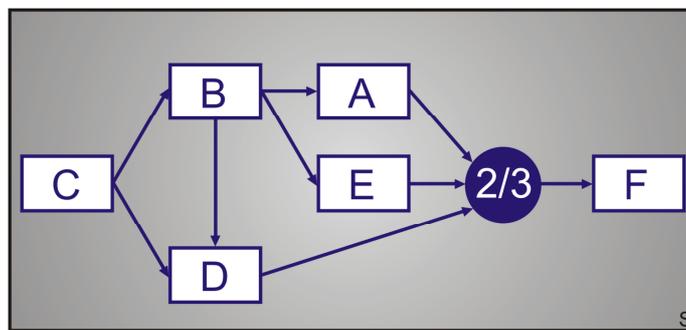


Figure 10: Structure d'un système complexe [49].

Différents outils existent pour aider le calcul de la fiabilité fonctionnelle d'un système complexe. La chaîne de Markov [53]-[56] et l'arbre de défaillance [29], [35], [37], [51], [57] sont parmi les plus courants. En aéronautique et aérospatiale il est également utilisé les chaînes fonctionnelles [58], prenant en compte ainsi plusieurs éléments qui sont nécessaires à la réalisation d'une fonction et, aussi, un élément qui sert à plusieurs fonctions.

Une fois que le système est en mode dégradé, il est possible de ne rien changer au niveau du système, parce qu'il est déjà tolérant à ce type de panne malgré une dégradation de la performance comme par exemple une pulsation de couple ou une surintensité. Sinon il est aussi possible que soit prévue une **reconfiguration** du système [10], [15], [49], [59]. La reconfiguration consiste à demander un comportement différent du système en mode dégradé. Un exemple simple est le remplacement automatique du bras défaillant par un bras redondant. Cependant, pour agir il faut **détecter le défaut**, reconnaître que le système se trouve en mode dégradé, détecter le **mode de défaut**, court-circuit ou ouverture d'une phase par exemple, et, parfois, localiser le composant défaillant. Ainsi, la fiabilité et la rapidité de la détection concernent le système. La détection des défaillances n'est pas traitée dans ce travail, mais, dans la littérature, on trouve différentes techniques [10], [49], [59]-[66].

De plus, il est possible de diviser les stratégies de reconfiguration en deux grands groupes : **reconfiguration en hardware** et **en software**. La reconfiguration en hardware comprend les remplacements d’un bras défaillant par un bras redondant à l’aide de composants d’isolation ou le choix d’une position convenable pour un bras sain, cette stratégie est possible pour une structure à pont-H [67]-[70]. En revanche, la reconfiguration en software caractérise les stratégies où les algorithmes de commande sont modifiés. Un exemple classique est le changement des repères au sein du contrôle. Les consignes de tension sont calculées permettant d’éliminer l’ondulation de couple lorsqu’une machine polyphasée perd une phase [10], [70], [71].

Un aspect important, en traitant de composants redondants, comme un onduleur à 4 bras qui alimente une machine triphasée, est le fait que le 4^{ème} bras se caractérise comme une **redondance froide** ou **passive**, dans d’autres mots, le bras ne fonctionne que lorsqu’un défaut survient. Il se peut que ce bras redondant soit en défaut avant même d’être mis en fonctionnement, sans que la faute soit détectée, bien qu’une double panne comme celle-ci soit peu probable. Pour empêcher ce type de situation, il est possible d’utiliser une **redondance chaude**, aussi appelée **active**, où une alternance d’utilisation entre les bras est mise en place afin que tous les composants soient utilisés presque tout le temps.

1.4.Structures à haut niveau de fiabilité

Plusieurs études dans le domaine des transports aéronautique, nautique et ferroviaire et même dans d’autres cas plus spécifiques comme des éoliennes *offshore* abordent le sujet de la tolérance aux défaillances proposant une multitude de structures [10], [15], [53], [61], [71]-[75]. Dans cette section les solutions pour obtenir un entraînement onduleur-machine tolérant aux défaillances les plus répandues dans la littérature sont présentées. Ces solutions sont tolérantes aux défaillances les plus courantes pour les entraînements [10], [49], [61], [68]. Ceci explique comment le système agit pour assurer un fonctionnement en mode dégradé et les inconvénients de son application dans le cadre du domaine aéronautique et aérospatiale.

1.4.1.Onduleur à bras redondants

Un bras redondant est un bras exactement pareil aux autres qui alimentent la machine en mode de fonctionnement normal qui est disponible pour remplacer le bras défaillant en mode dégradé [10], [15], [53], [62], [71], [73], [76].

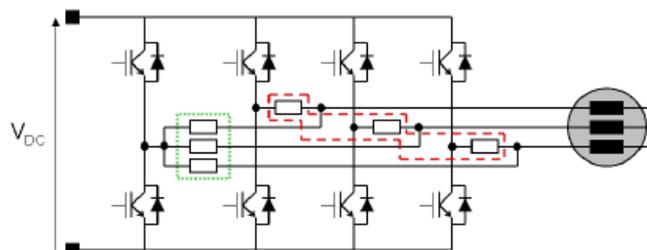


Figure 11 : Schéma d’une machine triphasée alimentée par un onduleur avec un bras redondant [10].

Cette solution est assez simple et le grand avantage est le fait que le système fonctionne en mode dégradé exactement comme il fonctionne en mode normal, c’est-à-dire, pas de surintensité ou d’ondulation de couple. Cependant, cette topologie possède certains inconvénients :

- Nécessité de plusieurs composants électroniques supplémentaires ;
- Risque de défaut non-déTECTÉ sur le bras redondant, si cela se comporte comme une redondance froide ;
- Nécessité d’une déTECTION du bras défaillant fiable et reconfiguration rapide du système à la défaillance ;

Plusieurs composants d’électronique de puissance sont nécessaires pour remplacer le bras défaillant par le bras redondant. En plus des transistors du bras redondant, qui ne servent que lorsque le système se trouve en mode dégradé, il est nécessaire de disposer de deux sectionneurs électroniques bidirectionnels par phase de la machine. Les TRIACs sont les composants les plus recommandés pour cette fonction parce qu’une fois le composant à l’état bloquant le courant qui le traverse est nul. Comme la Figure 11 montre, il faut un TRIAC pour isoler chaque bras en cas de défaillance et, en plus, il faut un TRIAC pour connecter le bras redondant à chaque phase de la machine, lors du remplacement du bras défaillant. Les composants supplémentaires augmentent le volume, le poids et la dissipation d’énergie du système et dégrade sa fiabilité structurelle. Chaque composant ajouté est un composant qui peut tomber en panne.

Le bras redondant dans ce système est caractérisé comme une redondance froide, c’est-à-dire, il ne fonctionne pas si le système n’est pas en panne. Ceci augmente le risque que le bras peut être en défaut sans être déTECTÉ par le système, vu qu’en mode normal ce bras n’est pas sollicité. Une solution pour ce problème est de changer de temps en temps le bras d’onduleur inactif en mode dégradé.

Cette topologie n’est tolérante aux défaillances que si le bras redondant remplace le bras défaillant. Pour cela, il faut que le calculateur contrôlant l’onduleur puisse déTECTER le bras défaillant et agisse assez rapidement pour que les effets de la faute n’endommagent pas d’autres composants. Ainsi, il faut une déTECTION de la panne et une réaction à cette panne rapide et efficace. Ces deux actions sont susceptibles à des pannes également comme la non-déTECTION de la panne, mauvaise déTECTION et mauvaise réaction à la panne, parmi d’autres. De plus, une mauvaise réaction serait suffisante pour la perte de l’ensemble onduleur-machine.

Pour ne pas avoir des problèmes de reconfiguration ou des TRIACs supplémentaires, il est possible de connecter le bras supplémentaire au point commun du couplage étoile (Figure 12) [10]. La possibilité d’avoir un courant de neutre non-nul permet que le courant des deux phases saines d’être découplés.

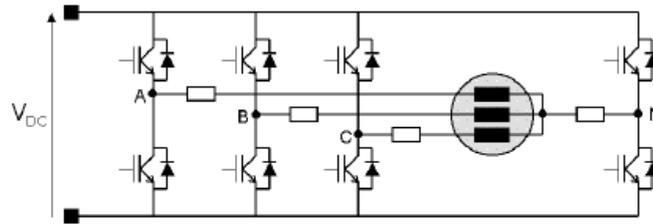


Figure 12 : Schéma d'une machine triphasée alimentée par un onduleur avec un bras redondant connecté au point commun du couplage étoile [10].

Le fonctionnement en mode dégradé sans reconfiguration est possible, mais le couple généré est pulsatoire. La reconfiguration est nécessaire afin d'éliminer l'ondulation de couple.

1.4.2. Machine à phases électriquement indépendantes

Les phases d'une machine peuvent être indépendantes ou non au niveau électrique, magnétiquement ou thermique. Les machines à phases électriquement indépendantes sont celles dont aucune connexion électrique n'est faite entre les phases de la machine, ajoutant ainsi un **degré de liberté (DoF – Degree of Freedom)** par rapport à la même machine couplée en étoile. Ce DoF supplémentaire rend une machine triphasée standard tolérante aux défaillances.

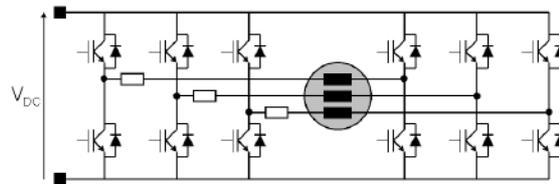


Figure 13 : Schéma d'une machine à 3 phases électriquement indépendante [10].

Cependant, pour l'alimentation de cette machine, deux bras d'onduleur par phase sont nécessaires, deux fois plus que pour une machine couplée en étoile. Cette modification de l'onduleur peut engendrer une augmentation du volume et du poids du système.

En mode dégradé, l'indépendance électrique entre les phases apporte plusieurs avantages [10], [15], [54], [63], [61], [67], [68], [74]-[76]. Lors d'un défaut où une phase n'est plus alimentée, il est possible d'implémenter des stratégies de contrôles assez simples pour éliminer des oscillations de couple en mode dégradé [10], [15], [61], [74], [76]. Si une phase est soumise à une surintensité, l'annulation du courant de la phase en défaut est possible en se servant d'un interrupteur bidirectionnel à pouvoir de coupure par phase, bien que cela représente une augmentation des composants du système.

1.4.3. Machines polyphasées

Les machines polyphasées sont celles dont le nombre de phases est supérieur à 3.

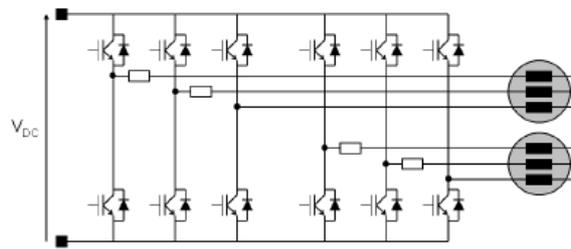


Figure 14 : Schéma d'une machine à 6 phases couplée en double-étoile [10].

Parmi ces principaux avantages se trouvent une réduction de l'ondulation du couple en mode normal et réduction de la puissance par phase [15], [40], [53], [61], [77]-[79]. Le fait d'avoir plus de phases permet aussi une plus grande liberté au niveau de la commande afin d'implémenter des stratégies plus complexes permettant une meilleure performance du système afin d'augmenter le couple [79], [80], réduire les harmoniques de courant [81] ou l'ondulation de couple [82]-[84].

Une **machine symétrique** à « n » phases est celle dont les phases sont électriquement déphasées de « $2\pi/n$ » de ses phases voisines. Ce déphasage entre les phases est le plus commun pour des machines à 5 ou 7 phases. Cependant, des machines à 6 phases se trouvent régulièrement avec un déphasage asymétrique. Une **machine** à 6 phases **asymétrique**, aussi appelée double-étoile, a un déphasage comme présenté sur la Figure 15. Ces machines sont en fait à 12 phases avec connections internes pour ramener à 6 phases d'où le déphasage de 30° entre les deux étoiles. L'intérêt de cette distribution électrique des phases est la réduction de l'impact de certains harmoniques de courant de l'ordre 5 et 7 [85]-[87], un avantage aussi pour ces machines polyphasées.

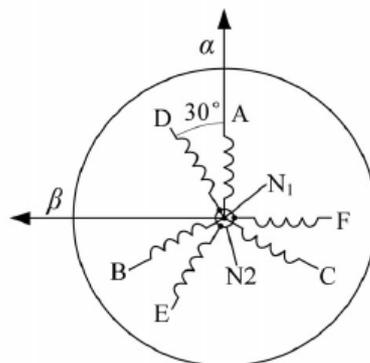


Figure 15 : Déphasage électrique entre les phases d'une machine à 6 phases asymétrique [81].

Cependant, la tolérance aux défaillances, inhérentes aux machines à plus de trois phases, se présente comme étant un de leurs principaux atouts [10], [15], [49], [54]-[56], [61], [73]-[78], [86], [88]-[98]. Par rapport à la machine triphasée chaque phase supplémentaire apporte un DoF de plus. Ainsi, la perte du contrôle d'un courant d'une phase d'une machine polyphasée ne représente pas la perte du système. De plus, n'importe quelle machine polyphasée peut perdre des phases jusqu'à ce qu'il ne reste que deux DoF, le nombre minimum pour contrôler une machine. Pour cela, plusieurs études

ont proposé des machines polyphasées pour des applications dans les domaines aéronautique et aérospatiale [16], [30], [32], [40], [47].

Si aucune action n’est réalisée en mode dégradé, le système fonctionne en mode dégradé, mais le courant sur les phases saines est plus élevé et une pulsation de couple est presque inévitable. Plus important est le nombre des phases de la machine, plus faible est l’impact d’un défaut. En même temps, concernant les défauts multiples, évidemment, les phases saines se trouvent dans une situation plus contraignante quand il y a plus de phases en défaut, mais la distribution de phases en défaut est aussi importante [55], [56], [78], [98]. Par exemple, pour une machine à 5 phases, la perte de deux phases consécutives impacte différemment le système par rapport à la perte de deux phases « électriquement éloignées » l’une de l’autre.

Parmi les reconfigurations possibles en mode dégradé pour les machines polyphasées possédant plusieurs étoiles, la plus courante est celle visant à isoler une étoile [10], [61]. Par exemple, la Figure 14 présente une machine à 6 phases couplées avec deux étoiles. Lorsqu’un composant d’une étoile est en défaut, toute l’étoile peut être isolée par l’application d’une reconfiguration simple en hardware. Dans ce cas, si le système perd la moitié de sa puissance en mode dégradé. En revanche, la pulsation du couple est faible, parce qu’en mode dégradé la machine fonctionne comme une machine triphasée. Sinon, d’autres stratégies plus complexes se servant de degrés de libertés supplémentaires existent également [76]-[78], [88]-[92], [94]-[97].

Plusieurs études ont été aussi menées sur des machines à plus de trois phases électriquement indépendantes [53], [63], [70], [75], [94], [98], [99]. Ces topologies ont les avantages mentionnés dans la section 1.4.2, mais en mode dégradé le système possède plus de degrés de liberté pour réduire l’impact de la faute sur les phases de la machine ou pour implémenter des stratégies spécifiques pour le fonctionnement en mode dégradé [70], [94], [99].

L’inconvénient des machines polyphasées est similaire à celui d’autres topologies tolérantes aux défaillances. Puisque chaque phase doit être alimentée, le nombre de bras d’onduleur est proportionnel au nombre des phases.

1.5.Structures Multi-Machines

L’augmentation des charges électroniques dans les avions génère des contraintes au niveau du nombre de moteurs électriques et d’onduleurs supplémentaires qui peuvent alourdir l’appareil, surtout si des équipements redondants et/ou de protection sont rajoutés au système. Puisque le poids est un point critique dans le domaine avionique, différentes solutions s’appuient sur la mutualisation de l’énergie afin de réduire le poids total des équipements, tout en gardant la tolérance aux défaillances. Ces solutions peuvent être divisées en deux grands groupes : ceux avec les charges connectées en parallèle et ceux avec les charges connectées en série.

1.5.1. Couplage électrique en parallèle

La **connexion en parallèle** consiste en plusieurs charges qui sont alimentées par les mêmes bras d’onduleurs, ainsi réduisant leur nombre total.

Une solution qui se trouve déjà en étude chez Thales a été nommé PRISCA (PowerR Integrated and SCAlable) [42], [44]. Sept charges triphasées, comme l’ECS³ et le WIPS⁴, sont alimentées par 8 onduleurs également triphasés. La tolérance aux défaillances est assurée par le huitième onduleur qui peut se connecter à partir d’une matrice de commutateur électronique à la charge dont l’onduleur est tombé en panne (TABLEAU I). De plus, les charges sont de puissances et de profils de fonctionnement différents. Cette solution a donc pris en compte le fait que les charges les plus énergivores, comme le démarreur par exemple, consomment leur maximum d’énergie à un moment où d’autres charges sont éteintes. Ainsi, la mise en parallèle de 2 ou 3 onduleurs peut assurer la puissance nécessaire pendant une durée déterminée. Dans le projet PRISCA, les charges partagent un onduleur qui assure la tolérance aux défaillances du système.

TABLEAU I : Matrice de connexion entre les 8 onduleurs et les 7 charges du projet PRISCA.

Onduleur	ECS	VFSG ⁵	VFSG Excitation	VCS ⁶	115 V	WIPS	Ventilation
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

Une autre solution envisageable est la mutualisation des bras d’onduleur. Cette solution a été précédemment traitée dans différents papiers [100]-[111]. Ces papiers présentent le contrôle de « n » machines par « 2n+1 » bras [107]. Un nombre plus faible des bras d’onduleurs ne permet pas de contrôler les deux machines indépendamment [112].

Cette mutualisation des bras peut être utilisée afin de rendre le système tolérant aux pannes. Pour une structure avec deux machines triphasées alimentées chacune par trois bras d’onduleur, lors d’une faute sur un des bras, il est possible d’isoler le bras défaillant et de fonctionner avec les 5 bras sains restants (Figure 16) [102], [111].

³ Contrôle de l’environnement au sein de l’appareil

⁴ Système de dégivrage des ailes

⁵ Générateur de fréquence variable

⁶ Système du cycle de vapeur

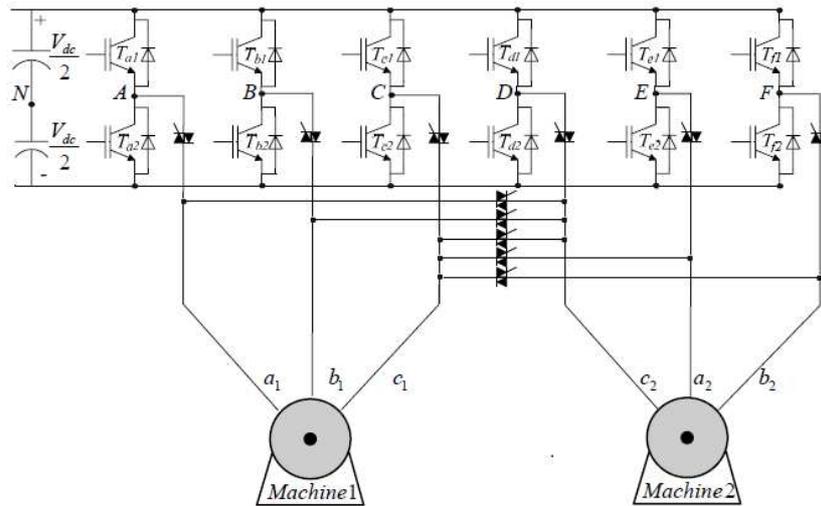


Figure 16: Schéma d’une structure 2 machines triphasées en étoile alimenté par 6 bras d’onduleur tolérant aux défaillances.

Cependant, certains problèmes de dimensionnement doivent être surmontés pour l’application de cette structure. Dans le cas de deux machines, les sources de tension et les bras partagés par les deux charges sont dimensionnés pour une puissance 2 fois plus importante, afin d’assurer un fonctionnement sans réduction de la puissance en mode dégradé. Par conséquent, différents papiers cherchent des commandes plus adaptées pour réduire le surdimensionnement du bras commun [102]-[104], [110] et de la source d’énergie [105], [106] ou encore réduire les commutations du bras commun [108].

1.5.2. Couplage électrique en série

La Figure 17 présente un exemple de **couplage en série** [113]-[121]. Cette structure encore peu connue dans le domaine académique et industriel connecte les phases de deux machines polyphasées en série d’une façon telle que chaque machine puisse être contrôlée indépendamment en couple et en vitesse.

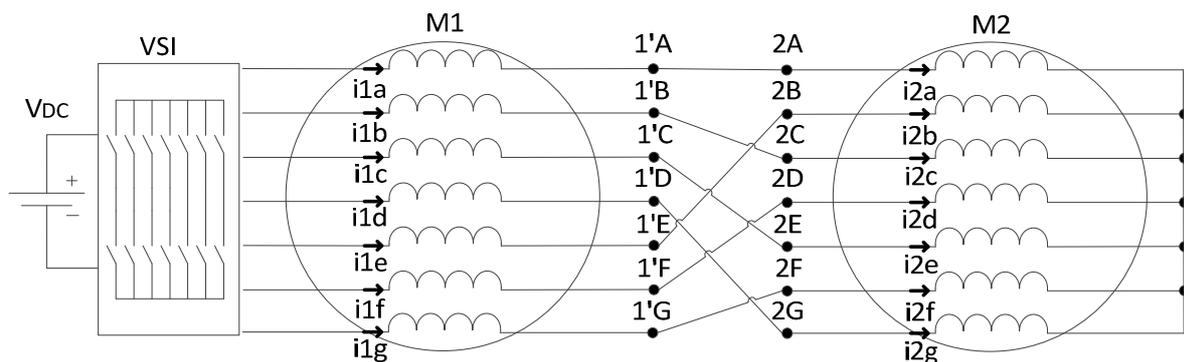


Figure 17 : Deux machines à 7 phases couplées en série.

Dans un contexte de réduction de coût du poids tout en gardant une fiabilité nécessaire pour les applications aéronautiques et aérospatiales, la connexion en série se présente comme une solution intéressante. Le fait de connecter les machines en série mutualise l’onduleur et il en résulte une

réduction de moitié du nombre de transistors [69], [114]-[117], [120], [122]-[124]. Par exemple, sur la Figure 17, deux machines à 7 phases sont alimentées par 7 bras d’onduleur.

De plus, la mise en série augmente les impédances inductives du système, filtrant ainsi certains harmoniques et pouvant alors réduire l’amplitude du courant en mode dégradé. Les applications compatibles à une topologie en série sont celles composées par deux machines qui doivent être contrôlées de façon indépendantes et qui doivent être tolérantes aux défaillances, justifiant ainsi l’utilisation des machines polyphasées. Cette description englobe plusieurs applications multi machines aéronautiques et aérospatiales.

En revanche, ces structures dissipent plus d’énergie en régime permanent parce que la résistance du système est également plus importante et même si une seule machine est en train de tourner, les deux dissipent. On pourrait donc également considérer des applications avec fonctionnement peu fréquent des machines et pour lesquels le coût de l’investissement est prépondérant par rapport au coût d’usage, ce dernier étant défini essentiellement par la consommation d’énergie et donc le rendement.

Enfin, la tension fournie par l’onduleur étant partagée par les deux machines, réduisant la tension disponible à chacune [119], [125], la détermination de la tension d’alimentation du système est plus délicate et de même les contraintes pour la tenue en tension des bobinages plus élevées.

Dans la suite, on cherche à exposer les conditions à vérifier pour obtenir que le contrôle en couple des machines connectées en série puisse effectivement être indépendant.

Premièrement, pour connecter deux machines en série, il faut des machines polyphasées, pour que le système dispose d’assez de DoF pour le contrôle en couple indépendant des deux machines. Classiquement, deux DoF par machine permettent la génération d’un couple constant pour une machine alimentée en régime sinusoïdal. Pour connecter « N » machines en les contrôlant indépendamment, une condition nécessaire est d’avoir plus de « 2 N » phases par machine parce que le nombre des phases est directement lié au nombre de DoF du système [113], [114], [116]-[119]. Ce nombre nécessaire de phases peut être encore supérieur dans le cas de systèmes tolérants aux défaillances, comme c’est le cas de cette étude.

Si on considère à présent le nombre de bras d’onduleur, la connexion en série de deux machines électriques à six phases ne diffère pas de l’alimentation « en parallèle » de deux machines triphasées chacune alimentée par 3 bras. La commande est indépendante dans les deux cas, la différence essentielle entre les deux structures se définit par rapport à la tolérance aux défaillances. Par contre, en [126], une comparaison est faite entre une structure en série et une structure en parallèle en utilisant les mêmes machines polyphasées et le même onduleur. Dans ce cas, la connexion en parallèle présentait un problème de courants non-contrôlables entre les deux machines.

Le premier papier proposant une structure de connexion en série a été publié en 2000 [113] avec un brevet associé. Ce papier démontrait théoriquement et par simulation la possibilité de connecter deux machines en série, tout en gardant une indépendance de la commande. Ensuite certains papiers ont commencé à étudier plus en détail la structure, toujours pour des machines asynchrones [85], [114], [115], [117], [118], [127].

Une propriété fondamentale qui est mise à profit pour pouvoir contrôler indépendamment les machines polyphasées connectées en série est la suivante. Une machine à « n » phases doit pouvoir être électriquement décomposée en machines ou circuit électriques diphasé et/ou monophasé équivalents parmi lesquels un seul circuit ou machine diphasé est à l'origine du couple lorsque la machine est alimentée en régime sinusoïdal. Dans ce cas si un courant circule dans les autres circuits de la machine à n-phase alors il ne produit pas de couple dans cette machine. Comment faire en sorte qu'un courant circule dans un circuit diphasé équivalent et pas dans un autre ? Cela est possible par la transposition de phases (Figure 17) qui fait en sorte que l'harmonique fondamental du courant à l'origine du couple pour une machine soit perçu par les autres machines comme circulant dans un de leurs circuits électriques équivalents non productif de couple. Dans le cas de machines asynchrones, dont la FMM (force magnétomotrice) peut être contrôlée, ou des machines synchrones avec FEM sinusoïdale, la propriété fondamentale énoncée au paragraphe précédent est assez bien vérifiée. Si par contre dans une machine, du couple peut être produit avec des harmoniques de courant alors l'indépendance stricte du contrôle des couples n'est plus guère possible.

Grâce à l'avancement des études dans le domaine, [115] a présenté des couplages permettant de contrôler indépendamment « N » machines avec « 2N+1 » phases connectées en série, y compris pour certaines machines symétriques⁷ à nombre pair de phases. Pour ces machines symétriques, en utilisant la méthode décrite dans [113] et [115] pour trouver les transpositions de phases, une machine à 6 phases symétrique ne pouvait être connectée qu'à une autre à 3 phases [114], [117], [118], [121], [125], [127]-[129]. De même, deux machines à 8 phases symétriques ne pouvaient être connectées qu'à une machine à 4 phases [114]. Par contre, il était possible de connecter en série deux machines à 6 phases asymétriques⁸ [85], [118], [130].

Une fois vérifiée les nécessaires contraintes topologiques permettant théoriquement le contrôle indépendant, il est nécessaire de réaliser la commande vectorielle du système. Pour les machines asynchrones, considérées dans la plupart des publications sur les machines connectées en série, les hypothèses suffisant à un contrôle indépendant sont facilement vérifiées : il suffit d'avoir une machine avec un coefficient de bobinage significatif uniquement pour le premier harmonique. Pour les machines à aimants permanents, si les forces électromotrices dues aux aimants ne sont pas sinusoïdales, l'obtention d'un contrôle indépendant est plus complexe. Des composantes de compensation doivent être ajoutées au sein du contrôle. Ainsi, [116],[120] et [129] ont présenté des résultats en simulation et expérimentaux pour des structures avec MSAP non-sinusoïdales connectées en série.

Sachant que le point central d'une topologie en série est la **transposition de phases** entre les machines, nous allons ci-dessous expliquer la méthode la plus utilisée pour choisir cette transposition.

⁷ Une machine symétrique à « n » phases est telle que les phases sont déphasées régulièrement entre elles d'un angle électrique de « $2\pi/n$ ».

⁸ Cette appellation asymétrique ([1]) est utilisée pour les machines à « k » étoiles, chaque étoile comportant « d » phases. Le déphasage électrique entre 2 phases successives d'une même étoile est de « $2\pi/d$ » et le déphasage entre deux étoiles est souvent de « $2\pi/(2*d*k)$ ». La machine asymétrique la plus connue comporte deux étoiles à 3 phases avec un déphasage électrique de 30° entre les étoiles.

1.5.2.1. Couplages électriques en série classiques

La transposition consiste à ajouter un angle α lors de la connexion en série. Par exemple, pour une machine à « n » phases, la phase 1 de la machine M1 est directement connectée à la phase 1 de la machine M2. Ensuite, la phase 2 de la machine M1 est transposée d’un angle « $2\pi/n$ », la connectant donc à la phase 3 de la machine M2. Par la suite, les phases 3 et 4 de M1 sont transposées respectivement de « $4\pi/n$ » et « $6\pi/n$ » et ainsi de suite jusqu’à ce que toutes les phases de la machine M1 soient connectées à une phase de la machine M2. Ceci est un exemple pour un angle de transposition α égal à « $2\pi/n$ », mais cet angle peut être n’importe quelle autre multiple de « $2\pi/n$ », l’angle entre deux phases d’une machine à « n » phases est donné par (Eq. 8).

$$\alpha = (s - 1) \frac{2\pi}{n} \quad (\text{Eq. 8})$$

Le tableau ci-dessous présente les connexions entre deux machines à « n » phases pour différentes valeurs de « s ».

TABLEAU II : Couplage entre deux machines à « n » phases pour différentes valeurs de « s ».

s	1	2	3	...	n-2	n-1	n
Phases de M1	Phases de M2						
1	1	1	1	...	1	1	1
2	2	3	4	...	n-1	n	1
3	3	5	7	...	n-3	n-1	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
x	x	2x-1	3x-2	...	(n-2)x-(n-3)	(n-1)x-(n-2)	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n-2	n-2	n-5	n-8	...	7	4	1
n-1	n-1	n-3	n-5	...	5	3	1
n	n	n-1	n-2	...	3	2	1

En regardant le TABLEAU II, il est possible de conclure que certaines colonnes ne sont pas intéressantes.

- « s » = « n » : Une seule phase de M2 est alimentée, rendant impossible que celle-ci tourne ;
- « s » = 1 : La transposition est en effet nulle, rendant impossible que les deux machines tournent à des vitesses différentes et générant des couples différents l’un de l’autre ;
- « s » = « n-1 » : Ce cas est similaire au cas précédent. A la différence qu’au lieu d’avoir deux machines tournant à la même vitesse, les deux machines tourneraient à des vitesses inversées.

Ainsi, il est possible de dire que « s » peut prendre une valeur de 2 à « n-2 ». Toutes les valeurs de « s » au-dessus de « n » sont redondantes par rapport aux valeurs déjà analysées à cause de la distribution circulaire de la machine tournante. Le TABLEAU III présente ainsi les couplages possibles entre deux machines à 7 phases.

TABLEAU III : Différentes connexions en série pour deux machines à 7 phases.

s	2	3	4	5
Phases de M1	Phases de M2			
1	1	1	1	1
2	3	4	5	6
3	5	7	2	4
4	7	3	6	2
5	2	6	4	7
6	4	2	7	5
7	6	5	3	3

1.5.2.2. Nouveaux couplages électriques en série

Avec la méthode présentée précédemment, certaines machines ne peuvent pas être couplées en série. Par exemple, le TABLEAU IV présente les connexions trouvées pour deux machines à 6 phases symétriques.

TABLEAU IV : Différentes connexions en série pour deux machines à 6 phases symétriques [109] .

s	2	3	4
Phases de M1	Phases de M2		
1	1	1	1
2	3	4	5
3	5	1	3
4	1	4	1
5	3	1	5
6	5	4	3

Il est visible, qu’aucune connexion ne permet d’alimenter toutes les 6-phases de la machine M2. Pour cela, plusieurs papiers [114], [117], [118], [121], [125], [127]-[129] proposent une connexion entre une machine à 6 phases symétrique et une machine à 3 phases.

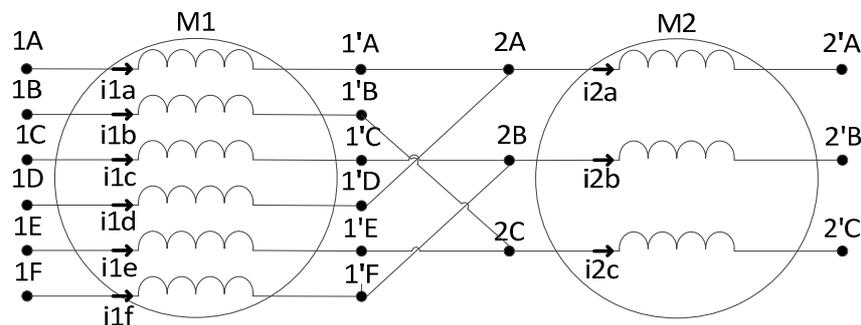


Figure 18 : Couplage entre une machine à 6 phases symétrique et une machine à 3 phases.

Néanmoins, en mettant à profit une symétrie d’une machine avec un nombre pair de phases, il est possible de faire des connexions inversées qui n’étaient pas prévues dans la méthode précédente. Cette nouvelle connexion a fait l’objet d’un brevet déposé par Thales Alenia Space [131], puis de

certaines présentations en conférence et articles rédigés dans le cadre de cette thèse [69], [71], [123], [124].

Concernant les connexions inversées, par exemple, alimenter la phase 1 d’une machine à 6 phases symétrique avec le courant alternatif « $i_1(t)$ » est électro-magnétiquement identique à alimenter la phase 4, celle qui est électriquement déphasée de π , avec le courant « $-i_1(t)$ », également déphasée de π . La Figure 19 et la Figure 20 montrent la différence entre une **connexion directe** et une **connexion inversée**.



Figure 19 : Connexion directe entre deux phases.



Figure 20 : Connexion inversée entre deux phases.

En reprenant le TABLEAU IV pour un couplage avec « $s=2$ », les phases « 1 » et « 4 » de M1 sont connectées à la phase « 1 » de M2. Grâce à la symétrie de la machine il est possible donc de connecter inversement une des deux phases de M1 à la phase 4 de M2, qui n’est pour l’instant pas alimentée. Désormais, des connexions inversées sont prises en compte en plus des connexions directes. Le TABLEAU V est donc obtenu dans lequel, les valeurs de « s » avec un « * » représente les couplages électriques avec connexion inversée entre phases, qui sont ensuite représentées par un signal « - » avant le numéro de phase de M2.

TABLEAU V : Différentes connexions en série pour deux machines à 6 phases symétriques prenant en compte les connexions inversées.

s	2	2*	3	4	4*
Phases de M1	Phases de M2				
1	1	1	1	1	1
2	3	-6	4	5	-2
3	5	5	1	3	3
4	1	-4	4	1	-4
5	3	3	1	5	5
6	5	-2	4	3	-6

Cette connexion inversée n’est pas applicable quand « s » est égal à 3 parce que trois phases de M1 sont connectées à chaque phase de M2 et la phase opposée de M2 est déjà connectée à une autre phase de M1.

Finalement, deux couplages, « $s=2^*$ » et « $s=4^*$ », sont possibles entre deux machines à 6 phases symétriques. C’est cette connexion qui est présentée dans le brevet posé par Thales Alenia Space [131], puis dans le dispositif expérimental de ces travaux de thèse. Un des objectifs de la thèse a été d’explorer plus en détail, notamment en mode dégradé, les potentialités de ce type de structure.

1.6. Travaux et positionnement dans le cadre du laboratoire

Cette étude se positionne dans la thématique d’étude des entraînements polyphasés de l’équipe commande du laboratoire L2EP.

Afin de rendre plus simple le contrôle des machines polyphasées, un formalisme vectoriel a été développé. Celui-ci se sert de la transformation de Concordia pour transformer mathématiquement une machine polyphasée à « n » phases dans un système avec « n » dimensions. La plupart de ces dimensions peuvent se regrouper 2 à 2, créant des plans totalement découplés les uns des autres. Ainsi, il est plus facile de contrôler chaque plan bidimensionnel indépendamment au lieu de contrôler un système de « n » dimensions.

Par analogie, on considère qu’un plan découplé est comme une machine fictive diphasée, dont les phases sont déphasées de 90 degrés, et les axes indépendants sont des machines fictives monophasées. Il est donc possible de corréliser le couple, la vitesse et le courant de chaque machine fictive avec les mêmes variables de la machine réelle. Pour cela, ce formalisme est aussi appelé décomposition en machines fictives et est expliqué plus en détail dans la section 1.6.1. Plusieurs papiers rédigés dans le laboratoire démontrent ce formalisme vectoriel théoriquement [116], [132], [133] et aussi expérimentalement [65], [66], [70], [92], [134]-[137].

En même temps, la Représentation Energétique Macroscopique (REM) a été développée. Cette représentation a comme but de formaliser la représentation d’un système complexe afin de faciliter la déduction de la structure de commande et aussi de mettre en évidence les degrés de liberté supplémentaires qui permettent l’application d’une stratégie qui pourrait améliorer la performance du système. Ainsi, cet outil a été appliqué avec succès dans des systèmes énergétiques multi-sources, comme par exemple des véhicules hydrides ou électriques, parce que la représentation aidait l’implémentation de stratégies de gestion d’énergie plus complexes [138], [139].

La REM s’est présentée également très intéressante pour les machines polyphasées. En fusionnant le formalisme vectoriel avec la REM, le rôle des degrés de liberté supplémentaires des phases au-delà de la troisième était évident [116], [120], [132]-[135], [137]. Ainsi, ces degrés de libertés pouvaient être forcément utilisés afin de réduire les pertes ou augmenter la densité de couple de la machine par exemple, mais aussi pour les applications tolérantes aux défaillances et pour la mise en série de machines électriques.

Dans le domaine de la tolérance aux pannes, les études comprennent des stratégies de contrôle en mode dégradé en se servant des DoF supplémentaires [70], [79], [94], [120]. Ceci a mené également à des études sur la détection de panne [63], [64], [65], [66] et le dimensionnement de machines tolérantes aux défaillances [79], [88], [136].

Concernant la mise en série, des papiers ont été rédigés en collaboration avec des spécialistes dans le domaine comme Emil Levi, afin d’utiliser le concept de décomposition en machines fictives pour démontrer qu’il est possible de découpler le contrôle de deux machines connectées en série [116], [120]. Cependant, d’autres topologies multi-machines ont été également analysées dans le laboratoire, comme les machines couplées en parallèle [100], [101].

Le travail présenté consiste à analyser le comportement d’un système multi-machine innovant en mode dégradé pour valider son intérêt scientifique et industriel par rapport à d’autres topologies standards qui n’assurent une tolérance aux défaillances que par l’ajout de composants supplémentaires qui rendent le système plus cher et plus lourd.

1.6.1. Décomposition en machines fictives

La décomposition en machine fictive est un outil régulièrement utilisé par le laboratoire pour contrôler des machines polyphasées [69], [101], [116], [120], [121], [123], [124], [132], [133], [135]-[137], [140]. Cet outil consiste en une décomposition d’une machine polyphasée en plusieurs **machines fictives** diphasées et monophasées, aussi appelées homopolaires. En effet, chaque machine fictive représente un plan ou un axe indépendant dans un domaine de « n » dimensions pour une machine à « n » phases, sur lesquels les courants et tensions sont projetés.

Chaque machine fictive interagit avec une gamme d’harmoniques des courants et de la FEM pour générer du couple et le couple réel de la machine polyphasée est la somme du couple généré par chaque machine fictive. Les machines diphasées peuvent générer du couple constant alors que les machines homopolaires ne peuvent générer que des couples comportant une pulsation.

Les harmoniques sont répartis entre les machines fictives comme dans le TABLEAU VI pour une machine à « n » phases symétrique. Les machines asymétriques, comme les machines double-étoile, peuvent aussi être décomposées en machines fictives, mais la distribution d’harmoniques entre elles dépend du déphasage entre les phases.

TABLEAU VI : Distribution d’harmoniques pour les machines fictives.

FM	Harmoniques
Principal (fondamental)	$1; n - 1; n + 1; \dots kn \pm 1$
2^{nd}	$2; n - 2; n + 2; \dots kn \pm 2$
\vdots	\vdots
x^{th}	$x; n - x; n + x; \dots kn \pm x$
\vdots	\vdots
$"n/2 - 2"^{\text{th}}$	$n/2 - 2; n/2 + 2; 3n/2 - 2; \dots kn \pm (n/2 - 2)$
$"n/2 - 1"^{\text{th}}$	$n/2 - 1; n/2 + 1; 3n/2 - 1; \dots kn \pm (n/2 - 1)$
Homopolaire 1	$n; 2n; \dots kn$
Homopolaire 2 (pour les machines à nombre pair de phases)	$n/2; 3n/2; \dots kn \pm n/2$

Puisque les machines fictives sont électriquement découplées entre elles, elles peuvent être indépendamment contrôlées. Finalement chaque machine fictive est contrôlée similairement à une machine triphasée standard, qui n’a qu’une machine fictive diphasée après la décomposition.

La décomposition est obtenue en se servant de la matrice de Concordia. Pour n’importe quelle variable (courant ou tension par exemple) ou paramètre (matrice de résistance ou d’inductance), la matrice de Concordia permet la transformation entre les valeurs réelles de la machine polyphasée et les valeurs pour les machines fictives.

1.6.2.Représentation Energétique Macroscopique

La **Représentation Energétique Macroscopique (REM)** est un outil de représentation des systèmes énergétiques en schéma bloc de façon méthodique afin de rendre plus simple sa visualisation et pour obtenir de façon méthodique la chaîne de commande [138], [139], [141]. L’intérêt de l’utilisation de cette méthode est accru lorsque le système étudié est plus complexe.

La REM est composée de deux parties distinctes principales : le modèle (en orange) et la commande (en bleu) (Figure 21).

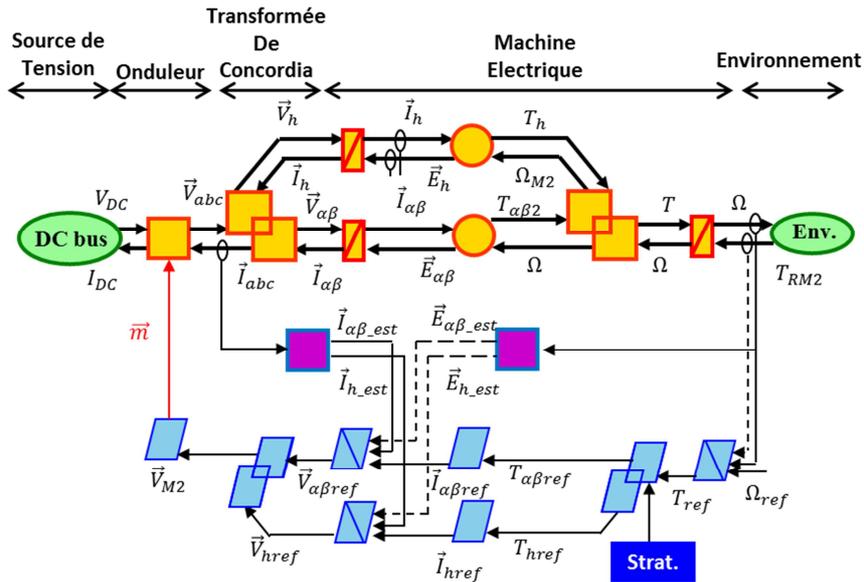


Figure 21 : Exemple de REM pour un contrôle d’une machine triphasée.

Le **modèle** est la partie où se trouvent les équations du système. Deux blocs consécutifs sont connectés par deux flèches, une dans chaque sens, représentant un flux et un potentiel, dont le produit représente la puissance transférée d’un bloc à un autre. Des flèches supplémentaires servent à intégrer des variables de contrôlées au modèle, comme par exemple le rapport cyclique d’un onduleur. La différence entre les différents blocs composant le modèle et la commande est expliquée dans l’Annexe 5.1.

La **commande** est formée par le principe de l’inversion. Par exemple, une machine triphasée alimentée par un onduleur et contrôlée en vitesse, la vitesse est le but du contrôle mais la seule variable sur laquelle il est possible d’agir est le rapport cyclique de l’ondeur. Ainsi, un chemin est défini entre la variable but et la variable contrôlable et tous les blocs traversés par ce chemin sont inversés.

En plus du modèle et du contrôle, il existe encore d’autres blocs :

- **Blocs d’environnement** (vert) : ces blocs représentent les éléments extérieurs avec le système étudié, mais qui interagissent avec lui. Sur la Figure 21, les blocs verts représentent la source électrique alimentant le système.

- **Blocs d’estimation** (rose) : ces blocs font le lien entre le modèle et la commande quand la commande nécessite une variable qui ne peut pas être directement obtenue, comme par exemple les courants dans les repères dq. En réalité, les courants des phases sont mesurés et ensuite un bloc d’estimation calcul la valeur des courants dq, à l’aide de la position électrique de la machine.
- **Blocs de stratégie** (bleu foncé) : ces blocs représentent les stratégies qui sont insérées sur la commande.

Il est important de souligner que la représentation REM permet de retrouver facilement où se trouvent les DoF pour ensuite rajouter une stratégie. Ces DoF se trouvent là où la sortie possède plus de dimensions que l’entrée. Par exemple, un bloc qui fait la conversion du couple en courant dq, ce bloc possède une entrée unidimensionnelle (le couple de référence) et une sortie bidimensionnelle (les courants de référence I_d et I_q). Le courant de référence I_q dépend du couple de référence, mais le courant de référence I_d peut être défini à partir d’une stratégie.

1.7. Résumé – Conclusion

Ce chapitre a présenté un des principaux verrous industriels et scientifiques pour l’électrification des avions et fusées aérospatiale : celui d’assurer les normes de fiabilité requises, sans que le coût et le poids des systèmes électriques ne soient trop élevés. Pour cela, des topologies tolérantes aux pannes et structures multi-machines ont été présentées afin de trouver une combinaison intéressante pour les applications aéronautiques et aérospatiales.

Parmi les structures multi-machines présentes dans la littérature, celles avec des machines connectées électriquement en série présentent d’importante réduction du nombre de transistors, pouvant réduire le poids et le coût de l’onduleur. De plus, avec la connexion inversée, une connexion en série des machines à 6 phases symétriques est devenue possible. Le fonctionnement de ces machines est très similaire à celui des machines triphasées classiques tout en étant tolérant à plusieurs défaillances.

La suite de ce travail présente les topologies qui ont été choisies pour une analyse plus approfondie, en prenant en compte ce qui a été présenté dans ce chapitre. La conclusion de cette étude consiste dans la comparaison de différentes topologies multi-machines. Cette comparaison comprendra, forcément, la performance du système en mode dégradé. Dans un deuxième temps, des stratégies sont appliquées afin d’améliorer davantage la performance de ces systèmes en mode dégradé, selon des critères qui sont définis dans le Chapitre 2.

2. Entraînement électrique avec deux machines tolérantes aux défaillances

Dans ce chapitre, les topologies onduleurs-machines tolérantes aux défaillances choisies pour une application aéronautique ou aérospatiale sont présentées et analysées. Cette analyse prend en compte leur fonctionnement en mode normal et en mode dégradé afin d'évaluer l'impact du mode dégradé sur leurs performances et sur le dimensionnement de l'ensemble onduleur-machine.

2.1. Topologies d'alimentation et de connexion étudiées

Afin de répondre au besoin du système TVC (section 1.2), les topologies qui sont étudiées plus en détail ont toutes les caractéristiques communes citées ci-dessous:

- 2 machines : le nombre minimum nécessaire de machines pour entraîner de façon indépendante les deux vérins qui composent le système TVC.
- Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP) : les MSAP sont les machines électriques présentant la densité de couple la plus importante, réduisant ainsi le poids du système, malgré le fait qu'elles soient plus coûteuses à cause des aimants terre rare utilisés, mais aussi malgré une gestion a priori plus délicate en cas de défaut de court-circuit du fait de la présence de forces électromotrices.
- Machines avec un minimum de 6 phases : ce nombre minimum de phases a été choisi afin d'assurer le fonctionnement en mode dégradé et également pour respecter des valeurs maximales de courant et de tension supportées par des transistors (type IGBT) et disponibles pour les sources de tension de la fusée. La valeur de tension du bus DC est imposée.
- Machines à phases électriquement indépendantes, à faible couplage magnétique et thermique entre phases: cette configuration présente une meilleure performance en mode dégradé parce que, lorsqu'une phase est défaillante, l'impact sur les autres phases est moindre. De plus, la tension que l'onduleur peut fournir à chaque phase est de $-V_{DC}$ à $+V_{DC}$, à condition d'avoir deux bras d'onduleur par phase.

En prenant en considération ces critères communs, 3 topologies ont été étudiées plus en détail. Pour chaque topologie, le nombre de phases de chaque machine peut être supérieur à 6, mais, en raison du matériel disponible dans le laboratoire, tous les résultats présentés sont pour les topologies avec 6 phases. Au long du mémoire, certains aspects des topologies à 7 et à 8 phases sont néanmoins abordés de façon théorique.

Le choix d'une machine à 6 phases correspond également à une demande des industriels. Cette machine est celle dont le comportement ressemble le plus à celui d'une machine standard triphasée. Cela permet aux industriels de faire évoluer par des modifications mineures des machines triphasées existantes au lieu de concevoir de nouvelles machines à 7 ou 8 phases. Par exemple, les machines utilisées comme base pour les essais de cette étude sont des machines à 12 bobines et 8 pôles