

# État de l'art et choix de la machine

## II. État de l'art et choix de la machine

### II.1. Introduction

Afin de pouvoir sélectionner la meilleure machine répondant aux besoins de notre application, un état de l'art sur les machines électriques destinées aux applications VE ou VEH est effectué dans ce chapitre. Les avantages et les inconvénients de chaque machine sont identifiés afin de pouvoir sélectionner la topologie la plus adéquate et répondant aux différentes exigences de notre application.

### II.2. État de l'art sur les machines électriques

#### II.2.1. Machines candidates pour la traction automobile

La motorisation électrique des véhicules est devenue depuis plusieurs décennies, un axe de recherche à part entière. Ainsi, différents travaux ont été effectués afin de sélectionner des machines électriques pouvant répondre aux besoins spécifiques de la traction automobile. En effet, les moteurs électriques destinés au VE et VEH doivent répondre à de multiples exigences [11]-[12] :

- Densités de puissance et de couple élevées. À titre d'exemple, le moteur de la Toyota Prius a une densité de couple de 5.6 Nm/kg et une densité de puissance de 1.6 kW/kg ;
- Large plage de vitesse incluant une zone à couple constant et une zone à puissance constante. À partir des VEs et VEHs analysés, cette plage doit s'étendre sur des vitesses supérieures à 6000 rpm et peut atteindre 14000 rpm ;
- Réponse en couple rapide, ce qui implique une faible inertie ;
- Rendement élevé couvrant une large plage de vitesse et de couple ;
- Fiabilité et robustesse élevées pour les différents modes de fonctionnement du véhicule ;
- Faible coût de fabrication.

À travers un état de l'art sur les machines électriques, on peut constater qu'il existe des machines particulières qui répondent aux exigences de la traction automobile. Ainsi, en analysant [11]-[16] et leurs références, trois principales familles de machines électriques sont candidates aux applications de traction automobile : i) les machines synchrones à aimants permanents, ii) les machines asynchrones et iii) les machines à réluctances variables.

Les avantages et les inconvénients que présentent intrinsèquement chacune de ces trois familles sont présentés ci-après.

### II.2.1.1. Machines synchrones à APs (MSAP) :

L'avantage principal des MSAPs est leur rendement élevé dû à l'absence de bobinage rotorique, et par conséquent, la réduction des pertes Joule de la machine. De plus, les APs présentent une forte densité d'énergie permettant à ce type de machines de fournir des couples et puissances élevés avec un volume et une masse des parties actives réduits. Ceci amène à de fortes densités massiques et volumiques de couple et de puissance.

Par ailleurs, l'inconvénient majeur de ce type de machines est lié aux APs. En effet, le flux d'excitation créé par les aimants reste relativement constant sur toute la plage de fonctionnement de la machine, ce qui implique une commande spéciale de l'onduleur afin de réduire ce flux lors du fonctionnement à haute vitesse. Ceci limite le fonctionnement à puissance constante sur une large plage de vitesse. Cette opération s'appelle « défluxage ». Elle sera abordée d'une manière détaillée par la suite.

Aussi, les APs à base de terres-rares, tels que les NdFeB, SmCo, qui sont utilisés pour les machines à hautes performances, sont sensibles à l'augmentation de température (diminution de l'induction rémanente) et peuvent se démagnétiser partiellement ou totalement si la température de Curie est atteinte. Ils sont le siège de pertes causées par la circulation des courants de Foucault (pertes par courant de Foucault), ce qui augmente leur température. Ce point sera abordé en détail dans les prochains chapitres.

On peut noter également que le coût des APs influence considérablement le coût total de la machine. Ainsi, on cherche à réduire la masse des aimants tout en assurant une densité de couple et de puissance élevés. Ce type de machines est largement utilisé dans l'industrie automobile [17]-[19].

### II.2.1.2. Machines asynchrones (MAS) :

Cette machine est très largement étudiée et utilisée pour différentes applications et cela pour les avantages qu'elle présente. En effet, sa simplicité, son faible coût et sa large plage de vitesse font d'elle une candidate intéressante pour les applications de traction automobile. Néanmoins, elle présente des inconvénients rédhibitoires pour ce type d'application. En effet, son rendement et son facteur de puissance sont moins élevés que celui des MSAPs, induisant un surdimensionnement de la batterie et de l'onduleur. La densité de couple et de puissance sont également faibles. Toutefois, la machine asynchrone demeure la machine la plus utilisée aux côtés de la MSAP pour des applications de traction/propulsion automobile [17]-[19].

### II.2.1.3. Machines à réluctance variable (MRV) :

Comme pour le cas des machines asynchrones, les MRVs présentent des avantages incontournables en termes de robustesse, de simplicité de fabrication, de coût et de fiabilité. En effet, le stator et le rotor sont réalisés par un simple empilement de tôles. Le rotor ne contient pas de bobinage ni d'APs, ce qui permet un fonctionnement à très hautes vitesses en toute fiabilité et en respectant les différentes contraintes de l'onduleur.

Néanmoins, cette machine présente un niveau élevé de bruit acoustique et un couple fortement ondulé, ce qui limite son application dans le domaine de la traction automobile. Selon [17]-[19], ce type de machine n'est pas utilisé en tant que moteur de traction/propulsion électrique. Cette machine demeure encore aujourd'hui au stade de recherche et développement.

Dans la suite de ce travail, nous allons nous intéresser aux MSAPs pour les nombreux avantages qu'elles présentent par rapport aux autres machines pour les applications de traction automobile.

Elles peuvent être réparties en trois catégories, selon la circulation du flux : i) MSAPs à flux radial, ii) MSAPs à flux axial et iii) MSAPs à flux transverse (Figure II.1).

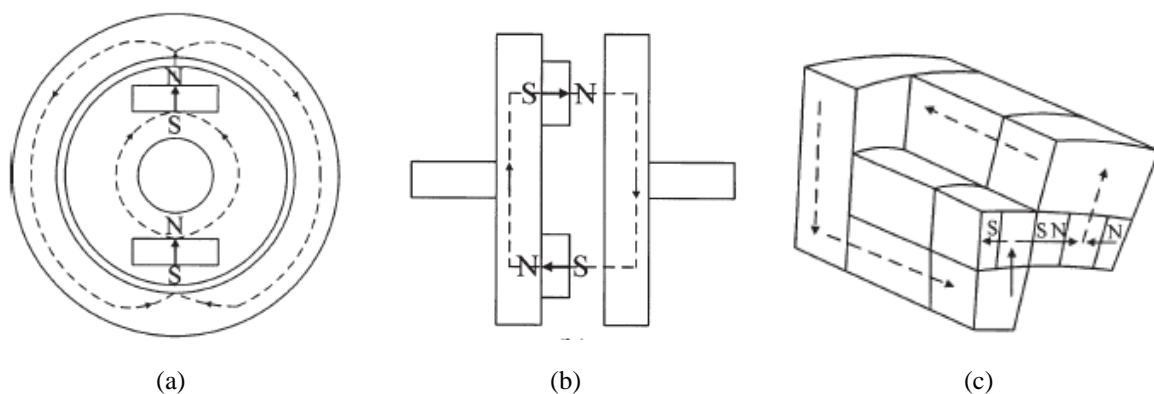


Figure II.1. Différentes classifications des MSAPs : (a) flux radial, (b) flux axial et (c) flux transverse [12].

### II.2.2. Machines synchrones à APs à flux radial

Les MSAPs à flux radial sont les machines les plus répandues et les plus étudiées. Elles peuvent être classifiées selon la position des APs au rotor. Ainsi, nous retrouvons des MSAP à APs montés en surface, insérés ou enterrés (Figure II.2). Les avantages et les inconvénients de chaque type de MSAP sont présentés ci-après.

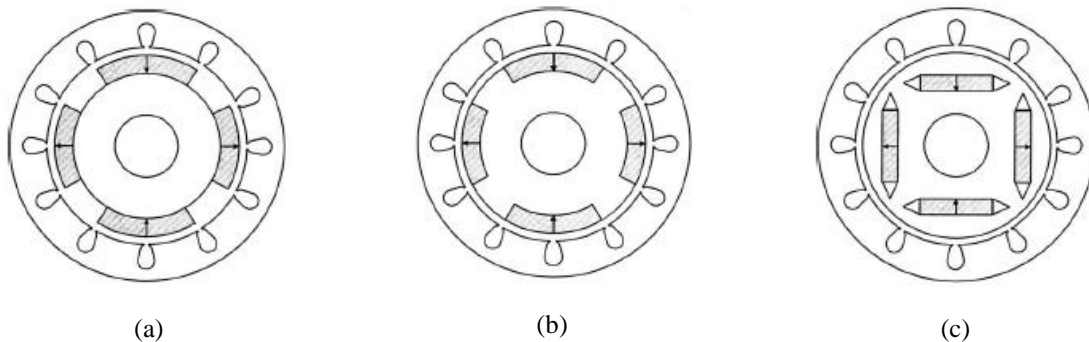


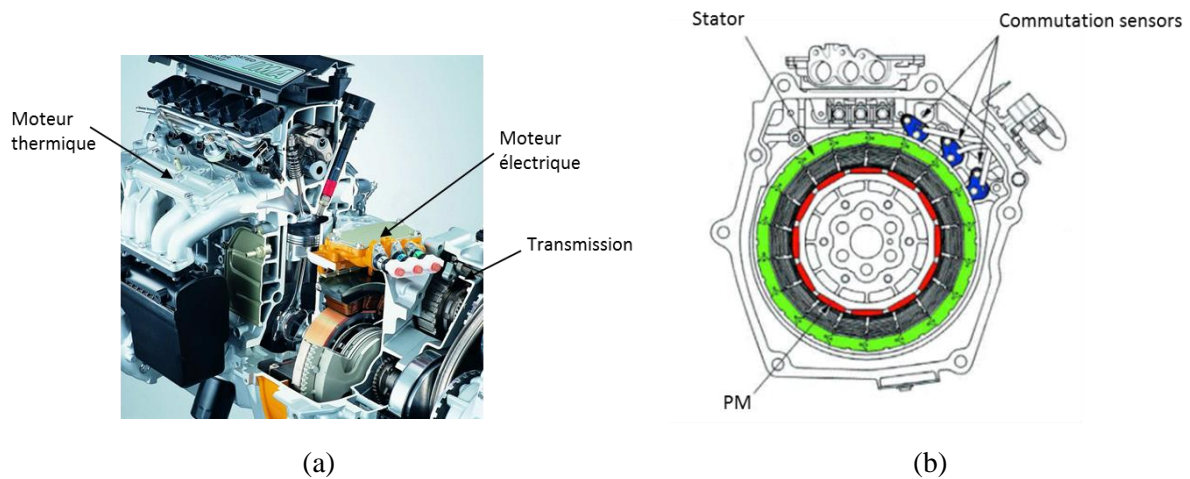
Figure II.2. Différents types de MSAP : (a) APs montés en surface, (b) APs insérés et (c) APs enterrés [12].

#### II.2.2.1. Machines synchrones à APs montés en surface (SPM) :

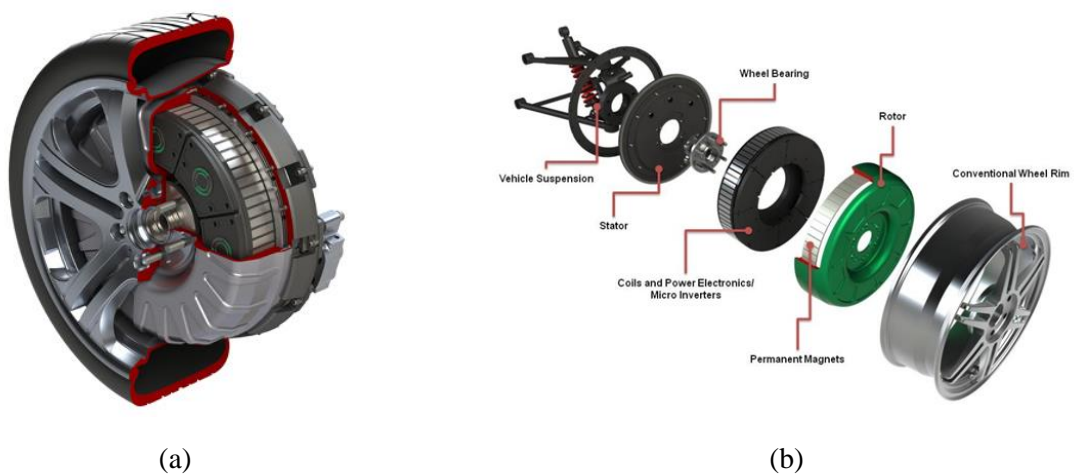
Ces machines présentent de bons rendements, la simplicité de la structure rotorique. Néanmoins, elles présentent certains inconvénients peuvent être résumés dans les points suivants :

- Faible tenue mécanique des APs ce qui limite le fonctionnement à vitesses élevées. Pour y remédier, on a souvent recours aux frettes amagnétiques ;
- Risque de désaimantation des APs avec un champ magnétique inverse ;
- Augmentation des pertes par courants de Foucault car les APs sont directement soumis aux fluctuations du champ magnétique dans l'entrefer ;
- Plage de fonctionnement à puissance constante limitée.

Ces machines ont été utilisées comme moteurs de traction pour des VE ou VEH. Ainsi, une SPM à bobinage dentaire segmenté est utilisée pour la Honda Insight et Honda Civic pour leur système IMA (Integrated Motor Assist) (voir Figure II.3). Le couple dé



Les SPM peuvent être également à rotor extérieur ce qui permet de les utiliser comme « moteur-roue ». Différents prototypes ont été réalisés, par exemple avec les moteurs développés par Protean (Figure II.4) ou TM4 (Figure II.5). La structure à rotor intérieur permet d'augmenter le diamètre d'entrefer comparativement aux structures à rotor intérieur pour un encombrement donné. La machine développée par Protean peut fournir un couple de 500 Nm en régime nominal et 800 Nm en régime transitoire, et une puissance maximal de 54 kW et 80 kW en régime nominal et transitoire, respectivement. Les durées de fonctionnement pour les deux régimes ne sont pas indiquées. Le refroidissement se fait par air et l'électronique de puissance est intégrée à la machine, pour une masse totale de seulement 31 kg et un volume de 15.9 litres (diamètre de 420 mm et longueur axiale de 115 mm).





### II.2.2.2. Machines synchrones à APs insérés :

Ce type de machines présente les mêmes inconvénients que les machines synchrones à APs montés en surface. Néanmoins, ces machines présentent des avantages spécifiques, hormis ceux génériques de toutes les MSAPs :

- Existence d'un couple de réluctance dû à la différence d'inductance d'axe direct ( $L_d$ ) et celle d'axe quadratique ( $L_q$ ). Dans ce cas  $L_d$  est inférieures à  $L_q$  ( $L_d < L_q$ ) ;
- Plage de fonctionnement à puissance constante étendue grâce à l'augmentation de l'inductance synchrone due essentiellement à la réduction de l'entrefer ;
- Meilleure tenue des APs.

### II.2.2.3. Machines synchrones à APs enterrés (IPM) :

Comme leur nom l'indique, les APs se trouvent à l'intérieur du fer rotorique ce qui confère à ce type de machine un certain nombre d'avantages :

- Meilleure tenue mécanique des APs ce qui permet le fonctionnement à hautes vitesses sans risque de décollement ou déplacement des aimants de leurs logements ;
- Diminution du risque de désaimantation des APs grâce à leur éloignement de l'entrefer et à la réduction des pertes par courants de Foucault dans les APs ;
- Existence d'un couple supplémentaire dû à la saillance (différence entre  $L_d$  et  $L_q$ ) ;
- Large plage de vitesse de fonctionnement à puissance constante ;
- Possibilité d'améliorer les performances électromagnétiques avec la concentration de flux.

Pour ce dernier point, différentes possibilités peuvent être envisagées. Ainsi, nous retrouvons des machines en « I », en « V » ou en multi-couches d'APs (Figure II.6). Les avantages du recours à la concentration de flux sont :

- Possibilité d'utilisation d'APs avec une induction rémanente moins élevée, comme les ferrites, et qui sont peu coûteux ;
- Augmentation du rapport de saillance, ce qui permet d'obtenir un couple de saillance important, surtout lorsque combiné à un bobinage distribué.

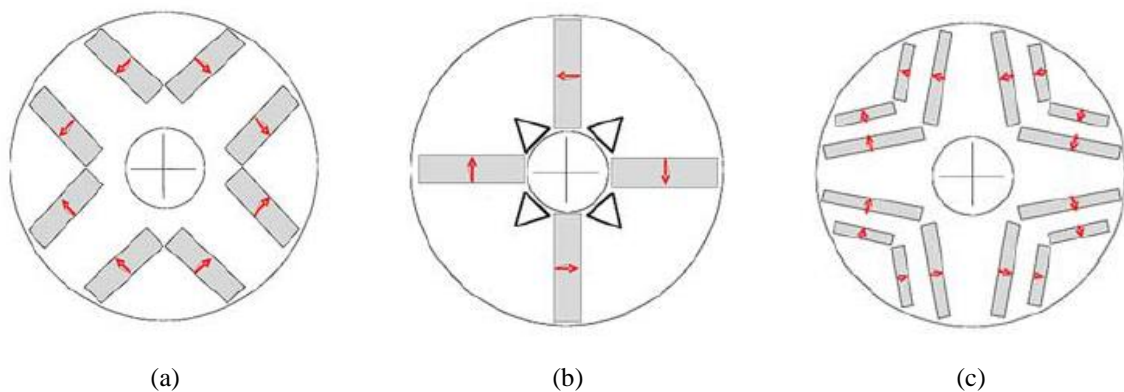


Figure II.6. Différents rotors de IPMs à concentration de flux : (a) APs en « V », (b) APs en « I » et (c) APs en « V » multi-couches [15].

Différents « benchmarks » et comparaisons des machines électriques utilisées dans la motorisation des VEs et VEHs ont été effectués et publiés durant la dernière décennie [16]-[19], [24]-[26]. Après avoir utilisé des SPMs pour leurs véhicules hybrides Insight et Civic (18-encoches/12-pôles), Honda a modifié, pour sa gamme hybride, la fabrication du rotor en insérant les APs dans le fer à la surface du rotor. Ainsi, la tenue mécanique se trouve améliorée et les pertes dans les APs diminuées. Le procédé de fabrication du stator n'a pas changé. Le stator avec des dents segmentées a été maintenu. La topologie choisie est 24-encoches/16-pôles (voir Figure II.7). Cette machine peut développer un couple de 135 Nm et une puissance de 12 kW (en pic). La masse totale de la machine est de 22.6 kg et un volume de 7.9 L. Ceci correspond à une densité de couple de 6 Nm/kg et 17 Nm/L [23].



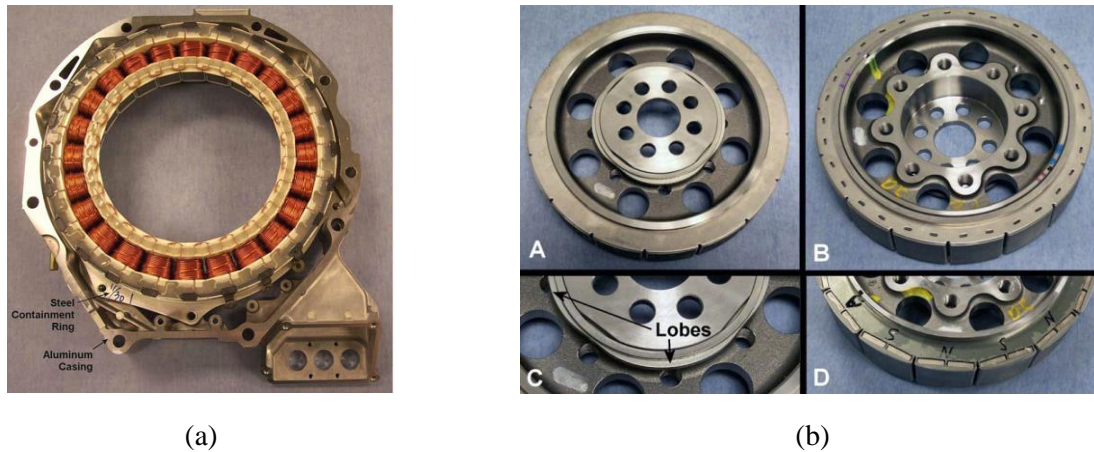


Figure II.7. Honda Accord 2005 : (a) stators à bobinage dentaire avec dents segmentées et (b) rotor à APs enterrés en surface [23].

Toyota et Lexus ont également adopté de machines IPM pour leurs gammes hybrides. Pour la Camry et Prius, des APs enterrés en « V » ont été choisis, alors que pour la Lexus LS 600h, des APs enterrés en triangle ont été adoptés (Figure II.8 et Figure II.9). Les stators sont à bobinage distribué pour augmenter le rapport de saillance et permettre ainsi d'augmenter le couple électromagnétique. Le couple développé par le moteur de la Toyota Camry est de 270 Nm pour une masse de 41.7 kg et un volume de 14.8 L, ce qui correspond à une densité de couple de 6.5 Nm/kg et 18 Nm/L. Le moteur de la Lexus LS 600h développe pour sa part un couple de 300 Nm pour une masse de 44.7 kg et un volume de 16.7 L, atteignant ainsi une densité de couple de 6.7 Nm/kg et 18 Nm/L. Le refroidissement des deux moteurs est liquide à l'huile. Ces couples sont transitoires et peuvent être appliqués pendant 18s.

Quant au moteur de la Toyota Prius, il peut développer un couple pic de 205 Nm pour une masse de 36.7 Nm ce qui correspond à une densité de couple de 5.6 Nm/kg. Le refroidissement est liquide à base d'huile.



Figure II.8. Toyota Camry et Lexus LS 600h : (a) stators à bobinage distribué et (b) rotors [24].



Figure II.9. Toyota Prius 2010 : (a) stator à bobinage distribué et (b) rotor à APs enterrés en « V » [24].

Hyundai, pour la Sonata Hybride, a choisi un moteur similaire à celui utilisé pour la Honda Accord avec 24-encoches/16-pôles à APs insérés dans le fer à la surface du rotor (Figure II.10). Le couple développé est de 205 Nm pour une masse totale du moteur de 27.2 kg, correspondant ainsi à une densité de couple de 7.5 Nm/kg. Le système de refroidissement est liquide à l'huile.

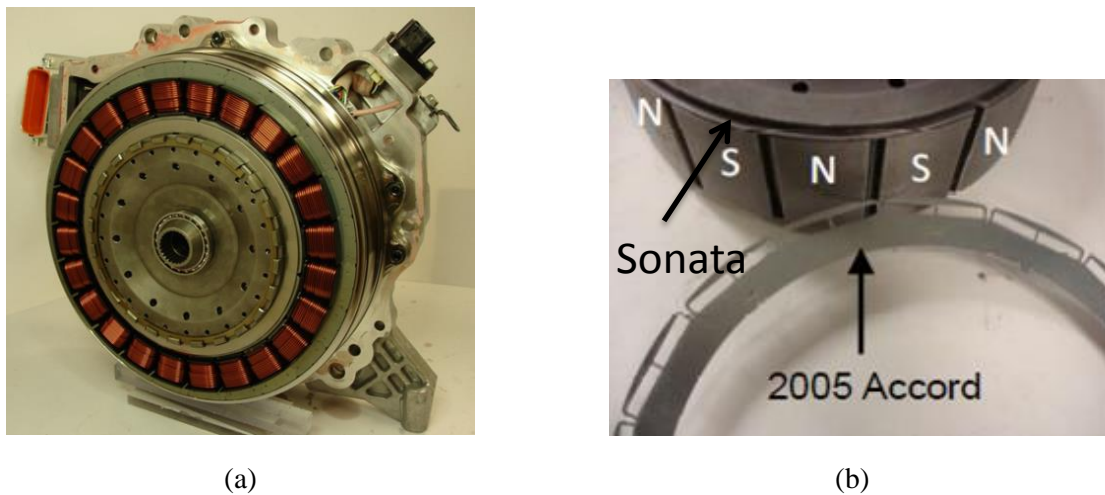


Figure II.10. Hyundai Sonata : (a) stator à bobinage dentaire et (b) rotor à APs enterrés en surface (stator et rotor similaires à Honda Accord) [25].

Nissan, pour sa voiture électrique Leaf, a choisi un moteur IPM à APs enterrés en triangle (similaire à celui utilisé pour le moteur de Lexus LS 600h), avec un stator à bobinage distribué (voir Figure II.11). La machine peut fournir un couple pic de 280 Nm pour une masse de 56 kg, ce qui correspond à une densité de couple de 5 Nm/kg. Le refroidissement est liquide avec un mélange eau/glycol.

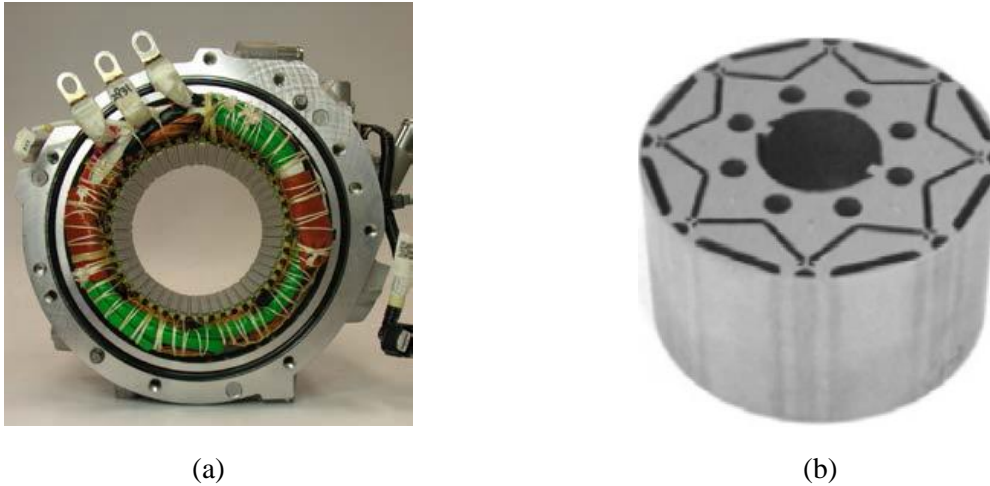


Figure II.11. Nissan Leaf : (a) stator à bobinage distribué et (b) rotor à APs enterrés en triangle [25]-[26].

BMW, pour sa voiture électrique i3, a choisi une IPM avec des APs en multi-couches (2 couches d'APs) avec des cavités d'air pour augmenter le rapport de saillance (Figure II.12). Le moteur électrique peut fournir un couple de 250 Nm avec un refroidissement liquide et une masse totale de 65 kg (incluant l'électronique), correspondant ainsi à une densité de couple de 3.85 Nm/kg.

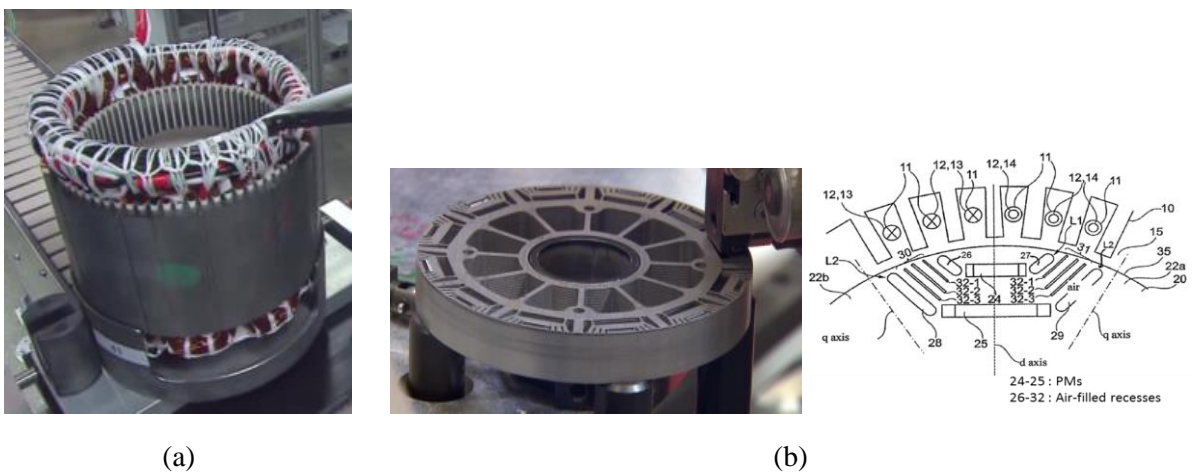


Figure II.12. BMW i3 : (a) stator à bobinage distribué et (b) rotor à APs enterrés [27]-[28].

### II.2.3. Machines synchrones à APs à flux axial

Théoriquement, toutes les machines radiales présentées précédemment ont leur machine équivalente à flux axial [29]. Ainsi, nous pouvons distinguer des machines à flux axial à APs montés en surface, insérés ou enterrés.

La machine à flux axial a été initialement introduite par Campbell en 1974 [30] pour une application de traction électrique ou de moto-ventilateur. Depuis, et jusqu'à aujourd'hui, la machine à flux axial a connu un intérêt de plus en plus grandissant de la part des chercheurs et des industriels, surtout dans le domaine de la motorisation des VEs et VEHS. Ceci peut être justifié par les multiples avantages qu'elle présente par rapport aux autres machines conventionnelles [14], [29]-[33]. Ils peuvent être résumés comme suit :

- Densités massique et volumique de couple/puissance élevées ;
- Entrefers facilement ajustable sans modification de la structure du stator ou du rotor ;
- Faibles niveaux de bruits et de vibrations ;
- Meilleures performances thermiques ;
- Volume et masse réduits par rapport aux machines radiales équivalentes.

#### II.2.3.1. Machines synchrones à APs montés en surface (SPM)

Ce sont les machines les plus étudiées dans la littérature et cela pour leur simplicité, compacité, hautes performances en couple/puissance et densité de couple/puissance. Néanmoins, elles souffrent des mêmes inconvénients des SPM équivalentes à flux radial.

Elles peuvent être classées selon le nombre de stators et de rotors qui les composent. Nous pouvons alors distinguer : i) un seul entrefer, ii) double entrefer et iii) multi-entrefers.

##### II.2.3.1.1. SPM à flux axial à un seul entrefer

Ces machines sont très compactes et peuvent atteindre des couples massiques et volumiques importants. De plus, elles sont simples à fabriquer. Néanmoins, elles sont pénalisées par la présence d'une importante force axiale qui risque de désaligner le rotor. Ceci conduit à la nécessité d'utiliser des roulements supportant de fortes contraintes, et par conséquent l'augmentation du coût.

Ces machines peuvent avoir des stators sans encoches, comme celle étudiée par Campbell en 1974 [30] où le bobinage est encastré au stator. Ceci permet de réduire les ondulations de couple ainsi que les pertes par courants de Foucault dans les APs. Aussi, le stator peut aisément être fabriqué en enroulant une tôle magnétique ou en utilisant de la poudre de fer (SMC : Soft Magnetic Core).



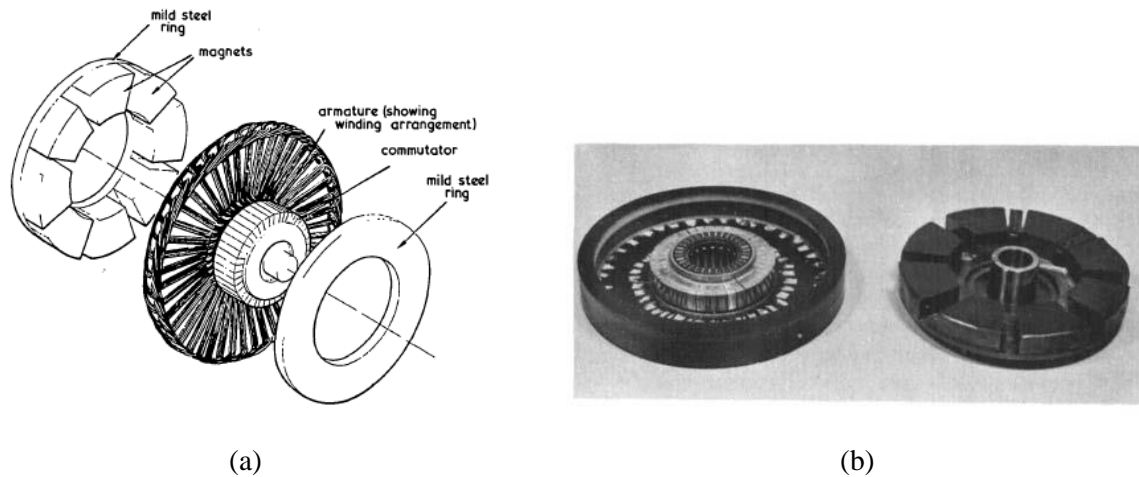


Figure II.13. SPM à flux axial à un seul entrefer à stator sans encoches : (a) schéma de la machine éclatée et (b) prototype de la machine [30].

### II.2.3.1.2. SPM à flux axial à double entrefer

Afin de réduire la force axiale sur le rotor, les machines à flux axial peuvent être à double rotor et un seul stator ou bien à double stator et un seul rotor.

La SPM à flux axial à double rotor et un stator intérieur, appelée « TORUS », a été introduite par Spooner *et al.* en 1988 [34]. La machine est représentée à Figure II.14. Le bobinage est de type toroïdal, comprenant 18 bobines enroulées autour du stator. Le rotor est constitué de 6 pôles (APs montés en surface) et d'un disque magnétique permettant le rebouclage du champ magnétique (Figure II.15). La machine a été réalisée pour une application génératrice.

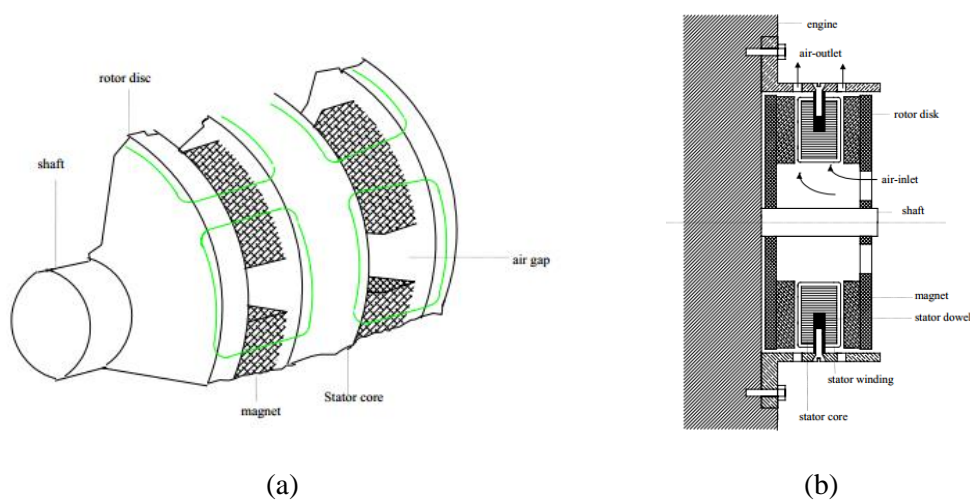


Figure II.14. TORUS à bobinage toroïdal : (a) représentation de la machine et (b) section de la machine [34].



Figure II.15. TORUS à bobinage toroïdal : (a) prototype de la machine (stator visible à 18 bobines) montée sur le moteur d'essai et (b) rotor de la machine (6 pôles) [34].

L'avantage principal des TORUS à bobinage toroïdal est la compacité de la machine et les faibles têtes de bobines. L'absence d'encoches au stator réduit notablement les ondulations de couple ainsi que les pertes par courant de Foucault. La fabrication du stator est plus facile qu'avec des encoches. Elle consiste simplement à enrouler une tôle. Néanmoins, le bobinage toroïdal induit un entrefer plus important, ce qui réduit l'inductance de la machine. Par conséquent, la plage de vitesse avec un fonctionnement à puissance constante est réduite. La TORUS à bobinage toroïdal est appelée également TORUS de type-NN (Figure II.16), et cela en raison de la position des APs de chaque rotor (APs de même polarité en face les uns des autres).

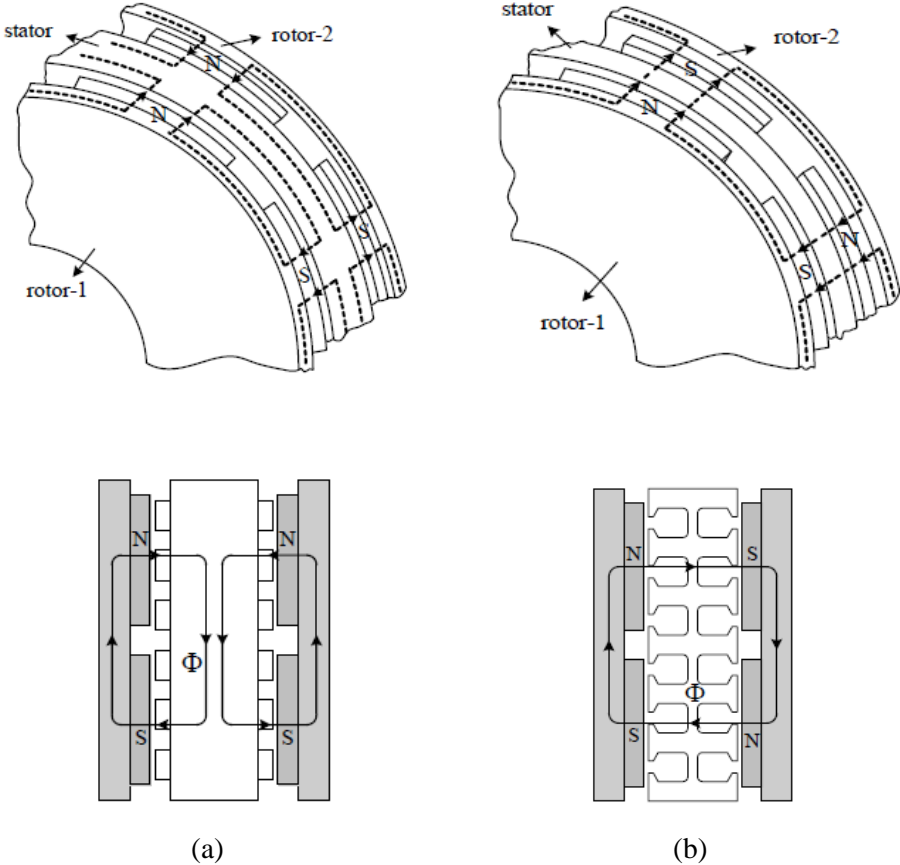


Figure II.16. Différents types de TORUS : (a) type-NN (b) type-NS [31].

En 1994, Caricchi *et al.* [35] ont utilisé la même topologie de machine pour la traction électrique (scooter électrique « Di-Electrica »). Le nombre de bobines est de 48 alors que le nombre de pôles est de 16 (Figure II.17).

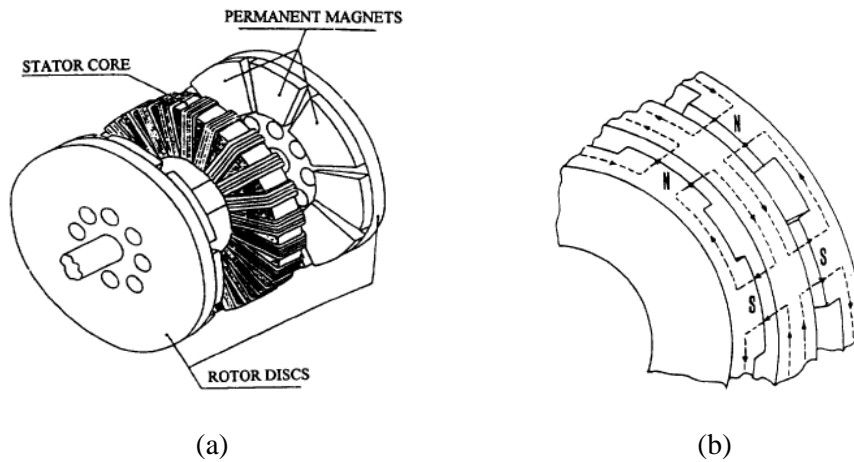


Figure II.17. TORUS à bobinage toroïdal : (a) machine éclatée et (b) chemin du flux dans la machine [35].

Le stator de la TORUS de type-NN peut être avec encoches, permettant ainsi de réduire l'entrefer et d'améliorer le fonctionnement à puissance constante. Ainsi, en 2006, Rahman *et al.* [36] ont étudié une TORUS avec 90 encoches et 30 pôles à bobinage toroïdal pour une application en moteur-roue d'un VEH à pile à combustible (Figure II.18). Des cales d'encoches magnétiques (en SMC) ont été utilisées, permettant d'augmenter l'inductance de la machine, et ainsi, améliorer ses performances en mode de défluxage. La machine peut fournir un couple pic de 500 Nm avec un refroidissement liquide.

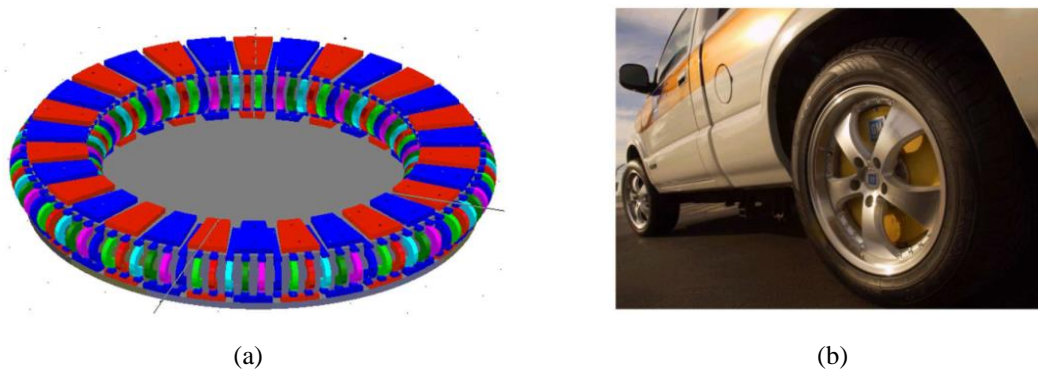


Figure II.18. TORUS avec encoches : (a) vue de la machine et (b) application en moteur-roue [36].



La machine à flux axial TORUS peut également être de type-NS (Figure II.16). L'avantage principal qu'elle présente est l'épaisseur réduite du fer statorique. En effet, le flux traverse axialement les dents statoriques, et ne circule pas tangentiellement dans le fer statorique. Ces machines présentent un faible entrefer, ce qui leur permet d'avoir une inductance élevée, et par conséquent, une large zone de fonctionnement à puissance constante. En outre, ces machines présentent, comparativement à celles avec un bobinage toroïdal, une meilleure robustesse.

Afin de simplifier la fabrication du stator avec encoches, l'utilisation des matériaux composites (SMC) s'avère une solution intéressante. Ainsi, en 2005, Chen *et al.* [37] proposent une machine avec un stator en SMC pour une génératrice d'éolienne (Figure II.19). L'inconvénient principal de ce type de machine est le faible niveau de saturation de ce type de matériaux, comparativement aux tôles ferromagnétiques. Néanmoins, cette solution permet de réaliser des structures complexes qui sont plus coûteuses à réaliser avec des tôles magnétiques feuilletées.

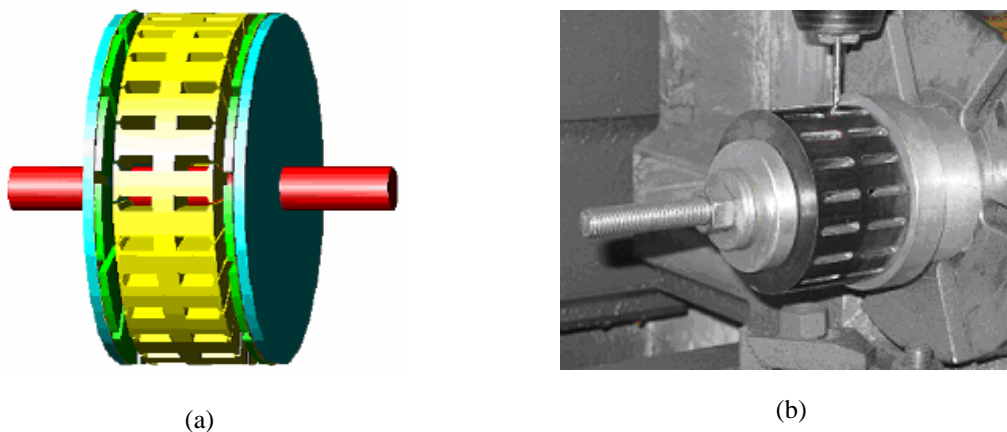


Figure II.19. TORUS avec stator en SMC : (a) vue de la machine et (b) fabrication du stator en SMC [37].

En raison du fait que le flux magnétique traverse axialement le stator dans les TORUS de type NS, Woolmer *et al.* [38] ont proposé en 2007 une machine avec un stator segmenté (YASA : Yokeless And Segmented Armature) pour une application dans une VEH à pile à combustible (LIFECar). Le stator est composé de dents en SMC segmentées et bobinées, ce qui facilite sa fabrication. Ceci permet également d'obtenir un taux de remplissage du cuivre élevé. Le couple maximal (pic) obtenu est de 300 Nm alors que la puissance pic est de 110 kW, ce qui correspond à des densités de couple et de puissance de 15 Nm/kg et 5.5 kW/kg. Le refroidissement adopté pour la YASA est de type liquide à l'huile.



Figure II.20. TORUS avec stator segmenté (YASA) : (a) vue de la machine et (b) chemin du flux [38].

Les dents peuvent être également réalisées avec un empilement de tôles afin de réduire les pertes fer statoriques, comme présenté par Vansompel *et al.* [39] en 2010. Ainsi, afin d'obtenir la forme originale de la dent (Figure II.22-a) qui est très coûteuse car nécessitant différentes formes de tôles, deux motifs de tôles peuvent être utilisés. Un empilement simple de chaque groupe de tôles avec un recouvrement total (Figure II.22-b) permet d'obtenir une forme approchée de la dent initiale. La solution proposée consiste alors à empiler alternativement chaque groupe de tôle avec un recouvrement partiel (Figure II.22-c) ce qui permet de se rapprocher considérablement de la forme souhaitée.

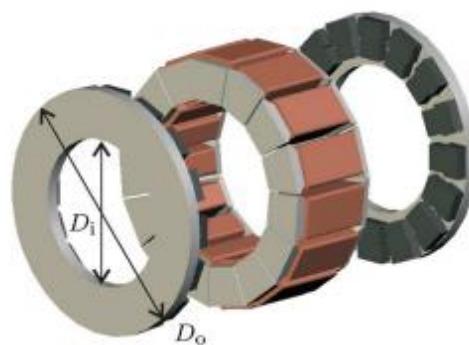


Figure II.21. TORUS avec stator segmenté (YASA) avec des tôles empilées [39].

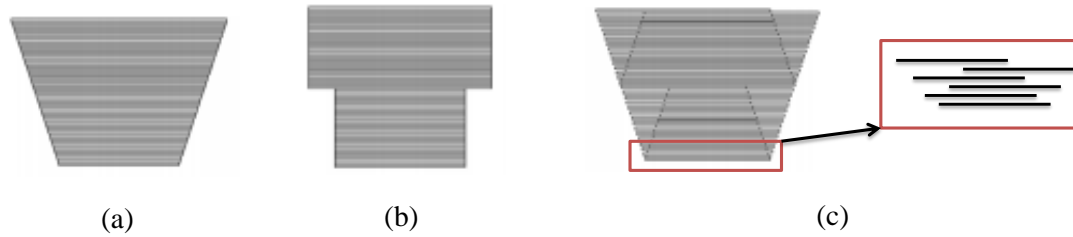


Figure II.22. Dents avec des tôles empilées : (a) forme souhaitée, (b) deux motifs de tôles avec recouvrement total et (c) deux motifs de tôles avec recouvrement partiel [39].

Le stator de la TORUS de type-NS peut être réalisé sans fer, car le flux magnétique traverse le stator axialement, comme celles étudiées dans [40]-[44]. L'avantage de ce type de machines est l'absence d'un couple de denture et la réduction des pertes par courant de Foucault dans les APs. En effet, les APs ne « subissent » pas les harmoniques d'espace générées par la variation d'entrefer. De plus, elles sont très compactes et légères, ce qui permet d'augmenter la densité de couple. L'inconvénient majeur est lié à sa faible inductance à cause de son large entrefer. Ceci limite le fonctionnement à puissance constante. De plus, les pertes par courant de Foucault dans les conducteurs sont importantes car ils sont directement exposés aux variations du champ magnétique. Une solution possible est l'utilisation d'un bobinage avec des fils de Litz (Figure II.24) permettant ainsi de réduire ces pertes [44].

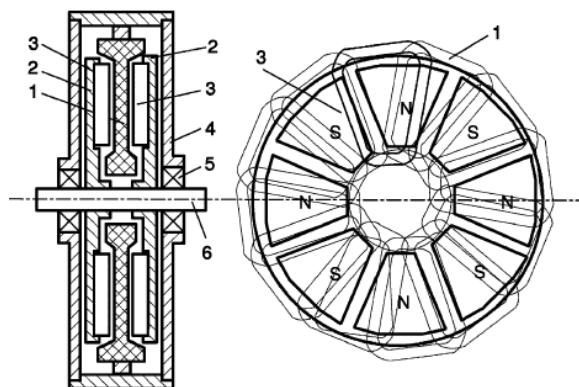


Figure II.23. TORUS sans fer statorique : (1) bobinage, (2) fer rotorique, (3) APs, (4) carter, (5) roulement, et (6) arbre [43].

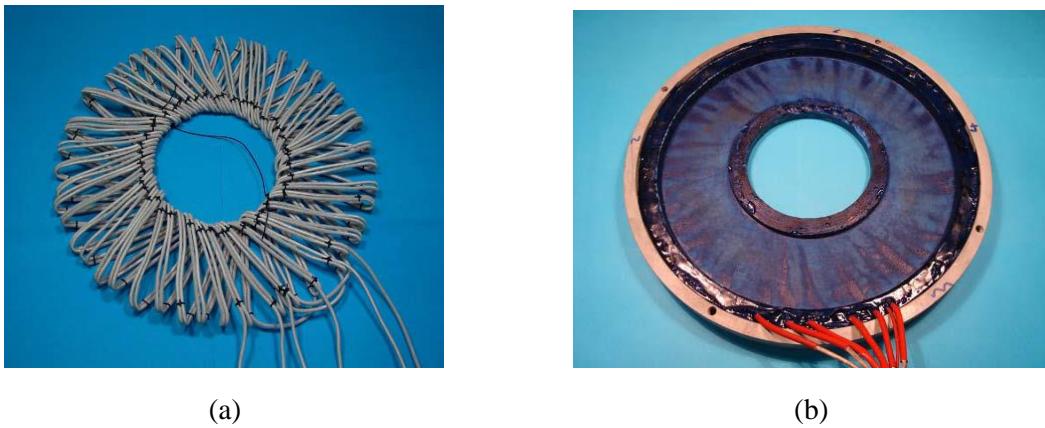


Figure II.24. Stator de la TORUS sans fer : (a) bobinage avec fils de Litz, et (b) stator après résinage [44].

Il existe également un autre type de SPM à flux axial à double entrefer, avec deux stators et un seul rotor intérieur. Ces machines sont appelées AFIR (Axial-Flux Interior Rotor) ou KAMAN. Comme les machines TORUS, elles peuvent être avec des stators sans encoches avec bobinage toroïdal, ou bien avec des stators avec encoches. Les avantages et les inconvénients de chaque type sont similaires à ceux de la TORUS.

### II.2.3.1.3. SPM à flux axial multi-entrefer

Ces machines sont utilisées pour les applications nécessitant de fortes puissances et densités de puissance. Elles peuvent être une excellente alternative dans les applications où le diamètre est limité par rapport à la longueur. Elles sont réalisées en alternant (n) stators et (n+1) rotors pour le cas des TORUS, et (n) rotors et (n+1) stators dans le cas des KAMAN. Elles peuvent être utilisées pour la traction/propulsion automobile (Caricchi *et al.* [45] en 1996) ou la traction ferroviaire (Feudale *et al.* [46] en 2005, et Anpalahan *et al.* [47] en 2006). Ainsi, la machine d'EVO Electric ([47]-[48]) possédant 54 encoches et 12 pôles avec un bobinage distribué, avec un simple entrefer, peut développer un couple maximal de 220 Nm (400 Nm en pic pendant 60 s) et une puissance maximale de 80 kW (167 kW pendant 60 s), pour une masse totale de 40 kg. Ceci correspond à des densités de couple et de puissance de 10 Nm/kg et 4.1 kW/kg en performances pic pendant 60 s. Le refroidissement adopté est de type liquide à eau.glycol.

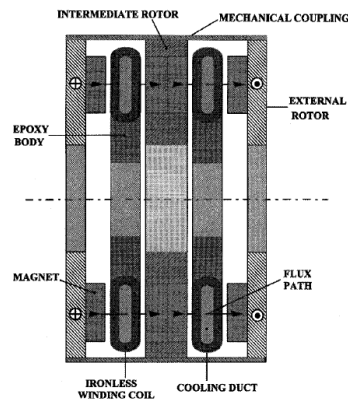
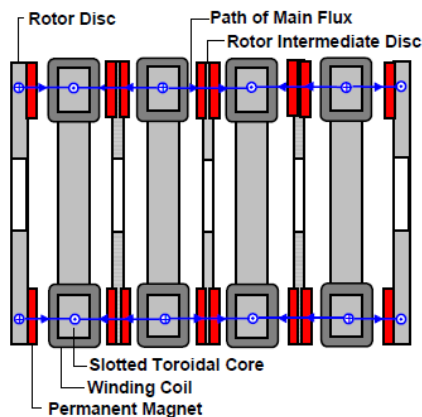
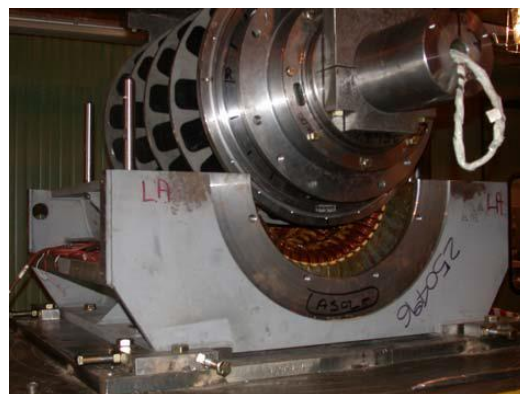


Figure II.25. Section d'une machine multi-entrefer (3 rotors et 2 stators sans fer) [45].



(a)



(b)

Figure II.26. SPM à flux axial à 5 rotors et 4 stators : (a) section de la machine, et (b) assemblage du prototype [46].

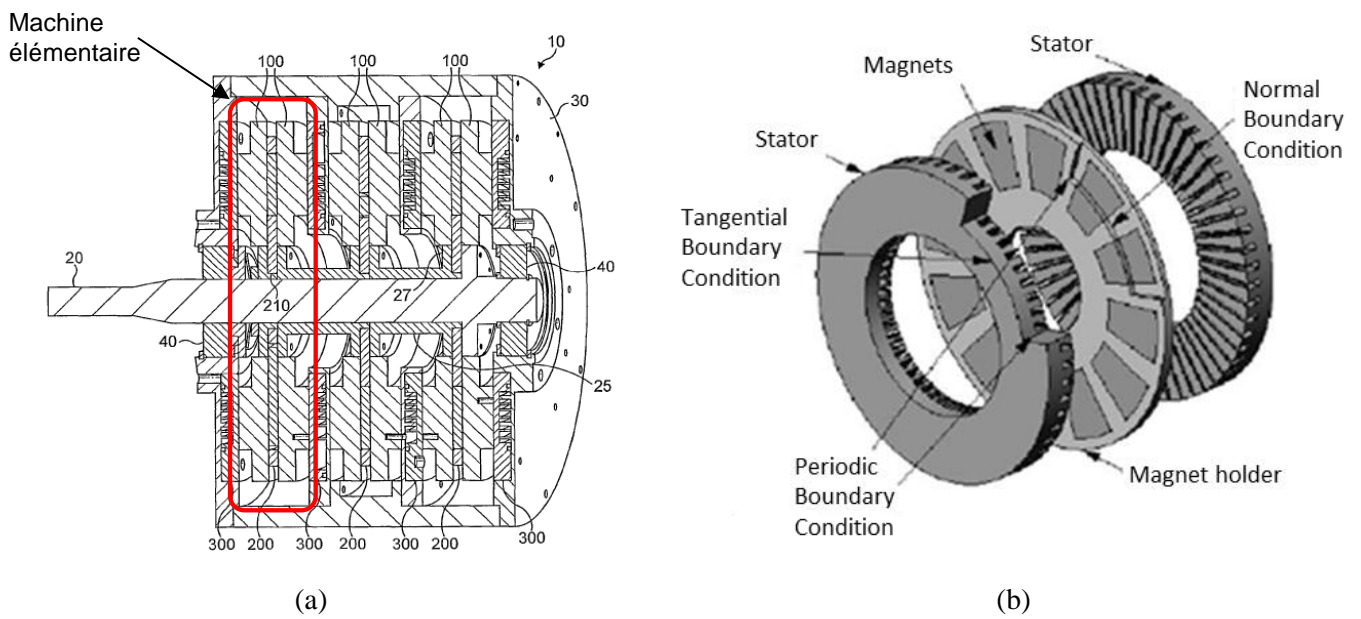


Figure II.27. SPM à flux axial avec assemblage de 3 machines AFIR : (a) machine totale, et (b) AFIR élémentaire [47]-[48].

### II.2.3.2. Machines synchrones à APs insérés et enterrés (IPM)

En 1996, Zhang *et al.* [49] ont proposé une TORUS à APs insérés dans le fer rotorique permettant d'obtenir un rapport de saillance ( $L_q/L_d$ ) supérieur à 2.5. Ceci permet d'augmenter le couple et d'améliorer le défluxage de la machine. L'aimantation des APs est circumférentielle ce qui permet d'augmenter l'induction dans l'entrefer grâce à la concentration de flux (Figure II.28).

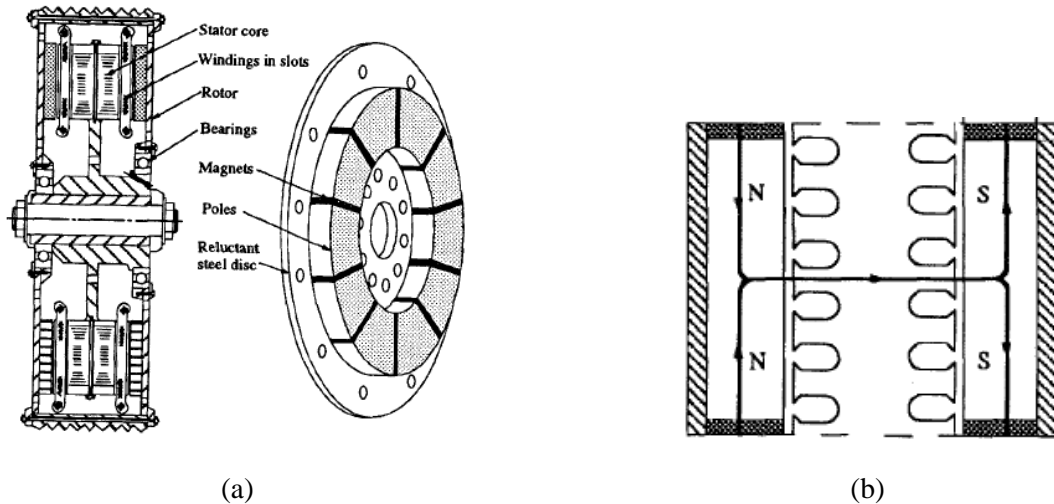


Figure II.28. IPM à flux axial TORUS : (a) section de la machine et vue du rotor, et (b) circulation du flux dans la machine [49].

En 1998, Profumo *et al.* [50] ont proposé une machine KAMAN à APs enterrés magnétisés axialement. Une pièce polaire en SMC a été ajoutée (Figure II.29.b) afin d'obtenir de la saillance et améliorer le maintien des APs.

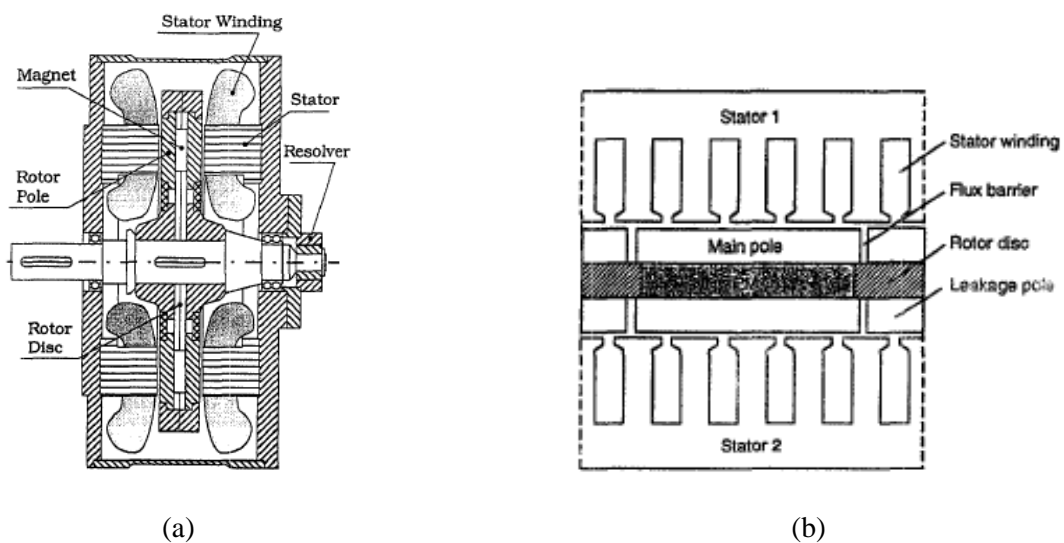
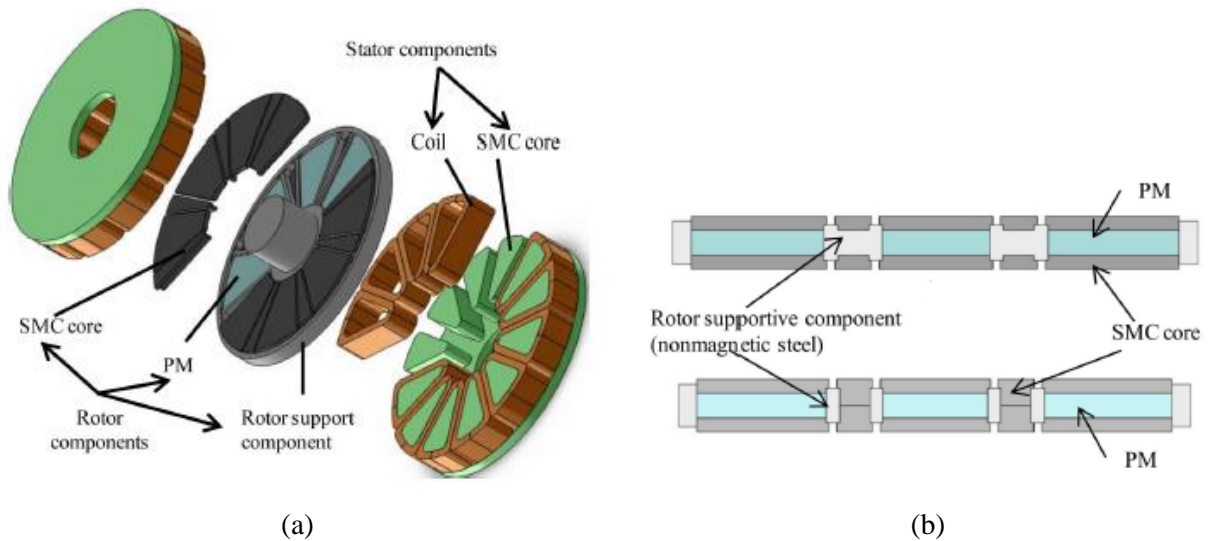


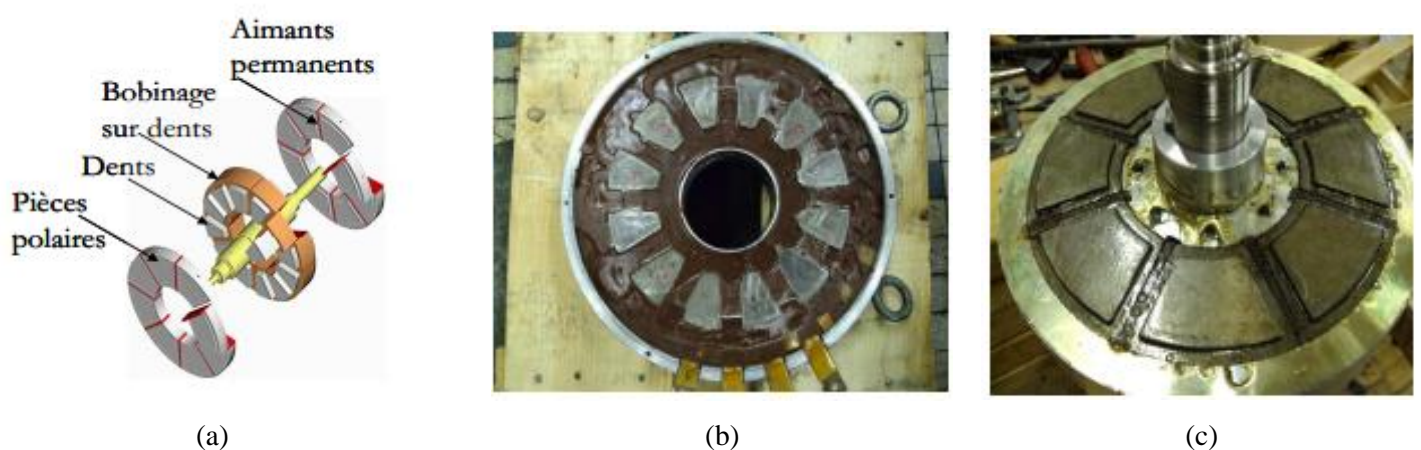
Figure II.29. IPM à flux axial KAMAN : (a) section de la machine et vue du rotor, et (b) circulation du flux dans la machine [50].



Une machine similaire a été étudiée par Arakawa *et al.* [51] en utilisant un bobinage dentaire. Les auteurs ont rajouté le SMC entre les aimants afin d'améliorer la saillance de la machine, et par conséquent augmenter le couple.



Durant ses travaux de thèse, E. Bommé [52] a étudié et réalisé une machine de type TORUS avec des APs insérés dans le fer rotorique réalisé avec du SMC. Le stator de la machine est constitué de dents en SMC bobinés, comme montré à Figure II.31. Cette machine est destinée pour une application VEH. Cette machine a été présentée en 2004 dans le brevet de Saint-Michel *et al.* [53].





Plusieurs structures à APs enterrés sont protégées par des brevets. Ainsi, en 2008, Minagawa [54] de la société Nissan a présenté différentes possibilités d'emplacement des APs à l'intérieur du fer rotorique. La machine étudiée est de type KAMAN à bobinage distribué. Certaines structures proposées paraissent difficiles à réaliser et peuvent présenter des flux de fuite conséquents dus aux rebouclages des lignes de flux des APs dans le fer rotorique. Nous simulerons quelques exemples proposés dans les brevets pour une meilleure analyse.

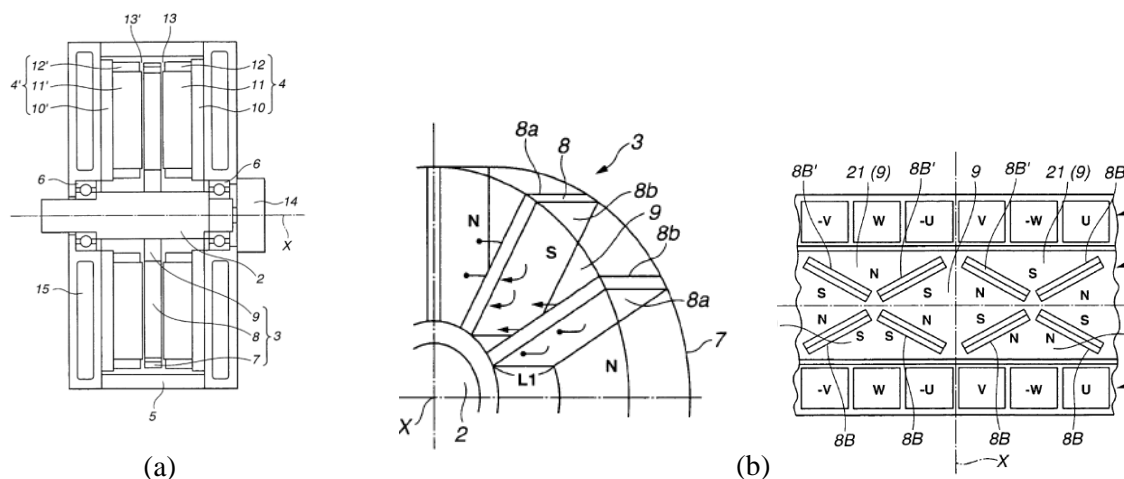


Figure II.32. IPM à flux axial KAMAN : (a) section de la machine, et (b) différentes dispositions des APs [54].

En 2009, Aydin *et al.* [55] de General Motors ont présenté une IPM à un seul entrefer. Le rotor de la machine est présenté à Figure II.33. Cette structure paraît également très complexe à réaliser avec une tôle magnétique enroulée. Cette difficulté s'accroît si les APs ne sont pas de forme parallélépipédique.

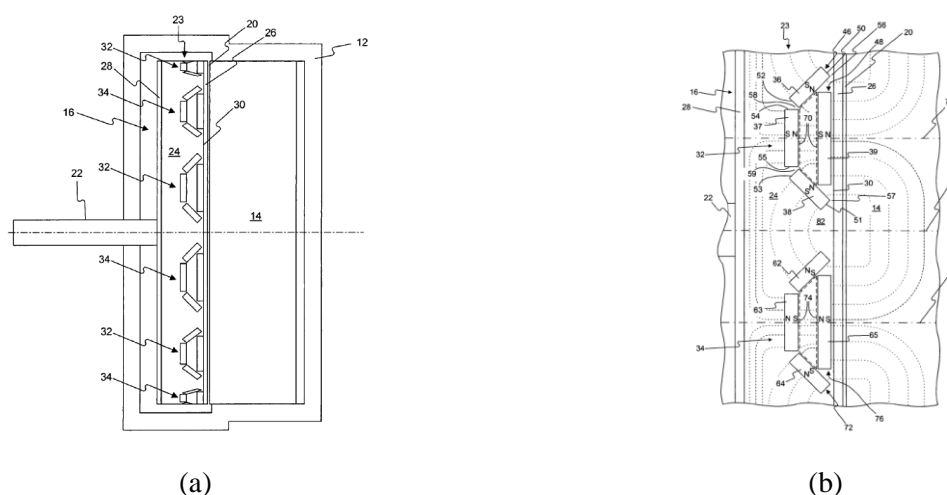


Figure II.33. IPM à flux axial TORUS : (a) section de la machine et vue du rotor, et (b) circulation du flux dans la machine [55].

En 2010, Atarashi *et al.* [56] de la société Honda Motors ont présenté différentes structures de rotor pour une machine à flux axial de type KAMAN. Les APs sont enterrés dans le fer rotorique afin d'améliorer les performances de la machine en termes de couple et de robustesse. Une des structures proposées est montrée à Figure II.34

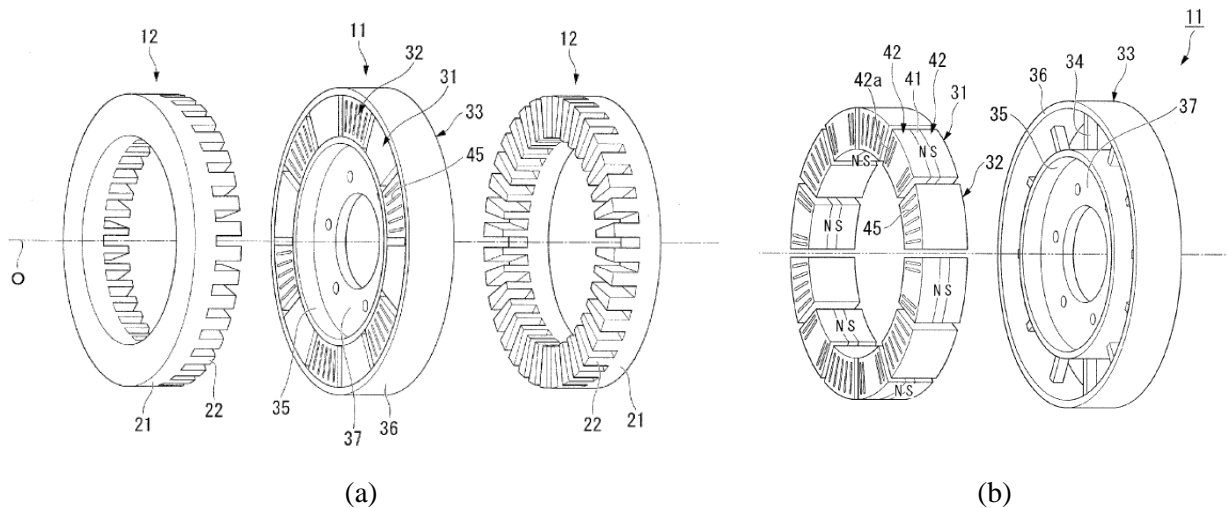


Figure II.34. IPM à flux axial TORUS : (a) section de la machine et vue du rotor, et (b) circulation du flux dans la machine [56].

En 2011, et suite à des travaux de thèse, Odvaka *et al.* [57] ont présenté une TORUS à APs enterrés dans un rotor réalisé avec des tôles magnétiques enroulées (Figure II.35). Le bobinage du stator est de type toroïdal.

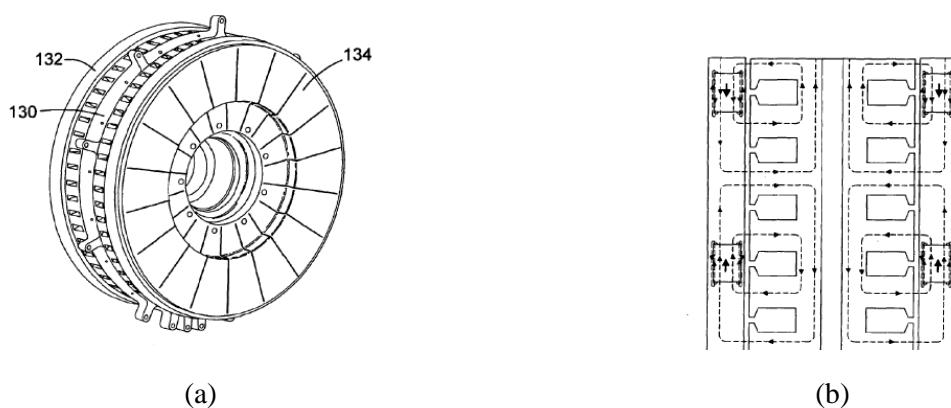
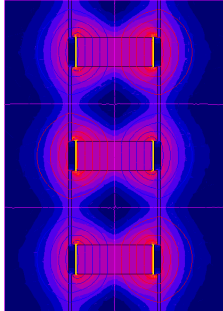
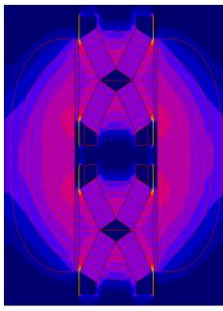
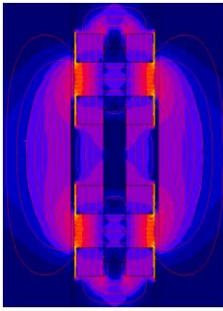
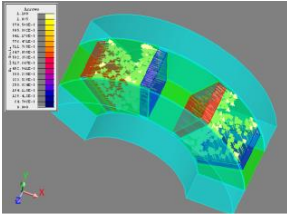
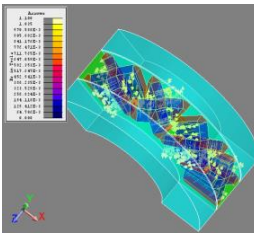
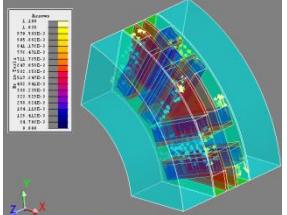
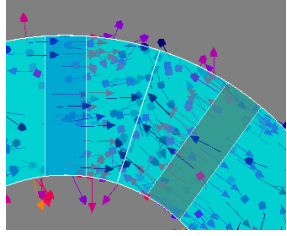
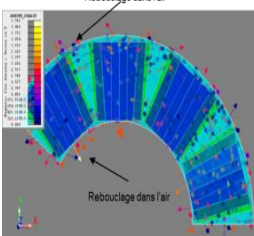
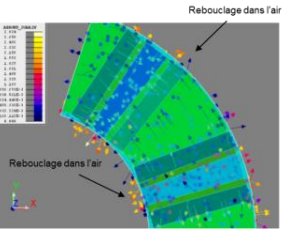


Figure II.35. IPM à flux axial TORUS : (a) section de la machine et vue du rotor, et (b) circulation du flux dans la machine [57].

## II. État de l'art et choix de la machine

Afin de mieux analyser les différentes solutions à APs enterrés, nous avons effectué des simulations éléments finis (EF) 2D/3D. Le critère de comparaison est l'induction moyenne sous un pôle pour un même volume d'AP (voir Tableau I.1).

Tableau II.1 : Analyse de quelques solutions de machines IPM à flux axial.

Simulations EF 2D/3D	IPM en « I »	IPM en « X »	IPM en « H »
EF-2D			
Induction moyenne sous un pôle	0.54 T	0.56 T	0.46 T
EF-3D			
			
Induction moyenne sous un pôle	0.46 T	0.27 T	0.28 T

Il apparaît que la machine à APs enterrés parallélépipédiques à concentration de flux (i.e., IPM en « I ») permet d'obtenir l'induction moyenne sous un pôle la plus élevée par rapport aux deux autres. De plus, elle est simple à réaliser, comparativement aux IPM en « X » et en « H ». La différence entre les inductions moyennes avec EF-2D et EF-3D est due aux flux de fuite qui ne sont pas pris en compte avec EF-2D. En effet, la machine IPM en « I » présente le minimum de flux de fuite dans l'air au niveau du rayon inférieur et extérieur, ainsi que dans le fer rotorique entre les APs.

### II.2.4. Machines synchrones à APs à flux transverse (MFT)

Ces machines sont caractérisées par un flux circulant dans les directions radiale, tangentielle et axiale (voir Figure II.36).

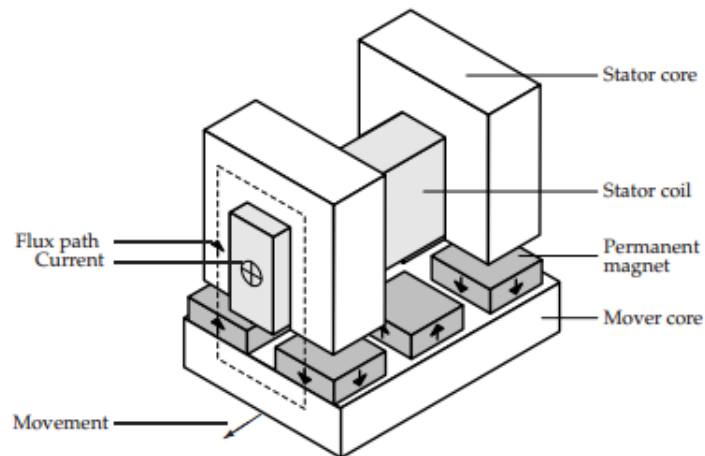


Figure II.36. Circulation du flux magnétique dans une phase de la machine.

L'avantage principal de cette machine est le fort couple qu'elle peut fournir à faible vitesse. La facilité de bobinage, ainsi que le fort taux de remplissage (jusqu'à 80%) permettent d'atteindre de bonnes performances en couple. De plus, la machine est très robuste. Néanmoins, elle présente un certain nombre d'inconvénients. Le faible facteur de puissance, dû aux flux de fuite importants, induit un surdimensionnement du convertisseur. Concernant la fabrication de la machine, son coût est élevé à cause de sa complexité. Généralement, la poudre de fer est utilisée pour la réalisation des culasses statorique et rotorique, et cela pour l'isotropie de ses propriétés. Néanmoins, le faible niveau de saturation peut réduire les performances de la machine [58]-[60].

### II.2.5. Machines synchrones à APs à bobinage concentrique

Durant ces deux dernières décennies, un intérêt particulier a été porté au bobinage concentrique appliqué pour les MSAPs et cela pour les nombreux avantages qu'il présente par rapport au bobinage distribué [61]-[66] :

- Courtes têtes de bobines, ce qui implique une réduction des pertes par effet Joule, de la masse et le volume du bobinage ;
- Meilleure capacité de défluxage, surtout en choisissant un nombre d'encoches par pôle et par phase fractionnaire ;
- Taux de remplissage des encoches élevé, surtout lorsque des stators segmentés sont utilisés ;
- Faible couple de denture, grâce à un choix d'un nombre d'encoches par pôle et par phase fractionnaire ;
- Meilleure tolérance aux défauts par rapport à un bobinage distribué. En effet, les bobines peuvent être connectées en parallèle ce qui confère une certaine marge de manœuvre en cas de dysfonctionnement d'une bobine. La détection des défauts est également facilitée ;
- Procédé de fabrication facilement automatisable, ce qui constitue un avantage considérable pour la production automobile en grande série.

Néanmoins ce type de bobinage présente certains inconvénients. Ceux-ci ne sont pas spécifiques à l'application aux moteurs de traction électrique et des voies d'amélioration existent. Nous pouvons citer :

- Force magnéto-motrice (FMM) riche en harmoniques d'espace, comparativement à un bobinage distribué, ce qui induit des pertes supplémentaires, surtout des pertes par courants de Foucault dans les APs. La présence d'harmoniques d'ordre inférieur augmente ces pertes. L'impact de cet inconvénient peut être atténué en choisissant d'enterrer les APs dans le fer rotorique ;
- Faible couple de réductance récupérable grâce à la saillance des machines IPM, comparativement aux machines IPM à bobinage distribué.

### II.3. Choix de la machine à étudier

À travers l'étude bibliographique effectuée, un tableau résumant les avantages et les inconvénients de chaque type de machine peut être dressé. Les machines sont notées par rapport à différents critères liés aux applications VE et VEH :

- Densité de couple : Les machines à forte densité de couple permettent d'atteindre des couples élevés pour des volumes et masses réduits. Cette caractéristique est primordiale dans la traction électrique où un fort couple est requis au démarrage et l'espace alloué au moteur électrique est réduit, notamment pour les applications VEH (selon les architectures choisies) ;
- Défluxage : Les moteurs électriques destinés aux applications de traction automobile doivent pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesse incluant une zone à couple maximal (phase de démarrage) et une zone à puissance maximale. La limitation de vitesse est souvent due à la limitation en tension de l'onduleur. Pour les machines à APs, le mode de défluxage consiste à injecter un courant d'axe direct (négatif) qui permet de ne pas dépasser la tension maximale. La capacité de défluxage est améliorée en augmentant l'inductance cyclique de la machine. Ainsi, comparativement aux IPMs, les SPMs qui possèdent un entrefer magnétique élevé (à cause des APs qui ont une perméabilité très faible et proche de celle de l'air), présentent des inductances cycliques plus faibles, et par conséquent une capacité de défluxage réduite.
- Tenue mécanique des APs : Afin de réduire les coûts d'entretien et de maintenance des machines, les APs doivent être « protégés » mécaniquement et magnétiquement, surtout pour des vitesses de fonctionnement élevées. Le maintien des APs devra être opéré avec des solutions efficaces et peu coûteuses. Les machines IPMs semblent être les solutions les plus intéressantes. Néanmoins, les SPMs peuvent recourir à des frettes amagnétiques qui maintiennent efficacement les APs à hautes vitesses. Cela amène, toutefois, à l'augmentation de leurs entrefers magnétiques, dégradant ainsi leurs capacités de défluxage.

Il est à noter que les différentes machines citées dans le tableau ci-dessous ne sont pas contraintes par un cahier de charges spécifique en terme d'encombrement, ce qui pourrait favoriser certaines machines par rapport à d'autres.

D'autres caractéristiques ont également été introduites dans la comparaison, telles que le rendement, le facteur de puissance, la simplicité et le coût. Bien qu'elles interviennent à différents niveaux d'importance, elles seront prises en compte pour le choix de la machine. Ainsi, nous privilégierons une machine avec un rendement élevé afin de ne pas affecter l'autonomie de la batterie, un facteur de puissance proche de l'unité afin de ne pas sur-dimensionner l'onduleur et la simplicité afin de permettre l'automatisation et la réduction du coût des procédés de fabrication.

Même si cette analyse comporte une part de subjectivité, elle permet ensuite d'orienter qualitativement le choix de la machine.

Tableau II.2. Avantages et inconvénients des machines électriques étudiées

	Densité de couple	Défluxage	Tenue mécanique des APs	Rendement	Facteur de puissance	Robustesse	Simplicité, coût
<b>MRV</b>	+	+++	/	++	+	+++	+++
<b>MAS</b>	+	+	/	-	+	++	++
<b>RFSPM</b>	++	+	-	+	+++	-	++
<b>RFIPM</b>	++	++	+++	+	++	++	+
<b>AFSPM</b>	+++	+	-	+++	+++	-	++
<b>AFIPM</b>	+++	++	+++	++	++	++	+
<b>MFT</b>	++	+	-	-	-	+++	---

**MRV**: Machine à réluctance variable, **MAS**: Machine asynchrone, **RFSPM**: SPM à flux radial, **RFIPM**: IPM à flux radial, **AFSPM**: SPM à flux axial, **AFIPM**: IPM à flux axial, **MFT**: Machine à flux transverse.

Ainsi, à partir du Tableau II.2, il ressort que la machine à flux axial à APs enterrés (AFIPM) est une machine candidate fortement intéressante pour les applications de traction/propulsion de VE et VEH. En effet, elle répond aux différentes exigences liées à ces applications, et qui sont :

- Densités de puissance et de couple élevées ;
- Large plage de vitesse incluant une zone à couple constant et une zone à puissance constante ;
- Meilleure tenue mécanique des aimants due à leur enterrement dans le fer rotorique ;

De plus, cette machine permet d'obtenir des rendements élevés couvrant une large plage de vitesse et de couple, nécessaires afin de ne pas dégrader l'autonomie de la batterie.

Outre ces exigences, cette machine répond parfaitement aux contraintes sévères liées aux applications VEH, notamment en termes de faible encombrement axial et de performances thermiques.



En ce qui concerne son bobinage, pour les nombreux avantages qu'il présente par rapport à un bobinage distribué, un bobinage concentrique à pas dentaire sera choisi.

### **II.4. Conclusion**

Au cours de ce chapitre un état de l'art sur les machines potentiellement intéressantes pour notre application a été effectué. L'étude a été effectuée essentiellement pour les machines à APs qui permettent d'obtenir des densités de couple et de puissance élevées. Au terme de cette étude, les différentes machines ont été comparées selon des critères exigés pour notre application dans un véhicule hybride. Ainsi, une machine à flux axial à APs enterrés a été choisie. Pour ses nombreux avantages, un bobinage dentaire a été considéré. Le pré-dimensionnement de cette machine, qui est basé sur un processus d'optimisation par algorithmes génétiques, ainsi que la modélisation numérique par EF-3D seront présentés au chapitre suivant.

### Références

- [11] Z. Rahman, M. Ehsani, and K.L Butler, "An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems", *SAE Future Transportation Technology Conference*, California, Aug. 2000.
- [12] K. T. Chau, C. C. Chan, and C. Liu, "Overview of Permanent Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 55, no. 6, June 2008.
- [13] C. Chillet, "Les moteurs à aimants permanents dans la traction électrique", *Colloque Energie Electrique et Transports Terrestres*, Belfort, Mar. 2003.
- [14] M. Zeroualia, M. E. Benbouzid, and D. Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study", *IEEE Trans. on Vehicul. Tech.*, vol. 55, no. 6, Nov. 2006.
- [15] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles", *Proc. IEEE*, vol. 95, no.4, 2007.
- [16] M. A. Rahman, and M. A. Masrur, "Advances on IPM technology for hybrid electric vehicles", *Proc. IEEE VPPC*, pp. 92 -97, 2009.
- [17] A. M. EL-Refai, "Motors/Generators for Traction/Propulsion Applications: A Review", *IEEE Int. Elec. Mach. and Driv. Conf. (IEMDC)*, pp 490- 497, May 2011.
- [18] J. Santiago, H. Bernhoff, B. Ekegard, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, "Electrical Motor Drivelines in Commercial All Electric Vehicles: a Review," *IEEE Veh. Tech. Soc.*, Feb. 2012.
- [19] A. M. Bazzi, "Electric Machines and Energy Storage Technologies in EVs and HEVs for Over a Century," *IEEE Int. Elec. Mach. and Driv. Conf. (IEMDC)*, May 2013.
- [20] <http://www.honda.com>
- [21] <http://www.proteanelectric.com>
- [22] <http://www.tm4.com>
- [23] R. H. Staunton, T. A. Burress, and L. D. Marlino, "Evaluation of 2005 Honda Accord Hybrid Electric Drive System", *ORNL report, ORNL/TM-2006/535*, Sep. 2006.
- [24] T.A. Burress, S.L. Campbell, C.L. Coomer, C.W. Ayers, A.A. Wereszczak, J.P. Cunningham, L.D. Marlino, L. E. Seiber, and H.T. Lin, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System," *ORNL report, ORNL/TM-2010/253*, Mar. 2011.
- [25] T.A. Burress, and S.L. Campbell, "Benchmarking EV and HEV Power Electronics and Electric Machines," *IEEE Transp. Elec. Conf. and Expo. (ITEC)*, Jun. 2013.
- [26] T. Kato, R. Mizutani, H. Matsumoto, and K. Yamamoto, "Advanced Technologies of traction motor for Automobile," *IEEE ECCE Asia Downunder (ECCE Asia)*, Jun. 2013.
- [27] J. Merwerth, J. Halbedel, and G. Schlangen, "Electrical Drive Motor for a Vehicle", U.S. Patent 2012/0267977 A1, Oct. 25, 2012.
- [28] BMW i3 Motor Manufacturing Landshut : <http://www.youtube.com/watch?v=2uz-Lv2qUA8>
- [29] C. C. Chan, "Axial-Field Electrical Machines: Design and Applications", *IEEE Trans. Ener. Conv.*, vol. EC-2, no. 2, pp.294 -300, 1987.
- [30] P. Campbell, "Principles of a permanent-magnet axial-field d.c. machine", in *Proc. IEE*, vol. 121, no. 12, pp. 1489-1494, Dec. 1974.
- [31] M. Aydin, S. Huang, and T. A. Lipo, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: a Review". *Proc. of SPEEDAM* , pp. 61-71, Jun. 2004.
- [32] A.M. EL-Refai, "Fault-Tolerant PM Machines: A Review", *IET Electr. Power Appl.*, vol. 5, no. 1, pp. 59-74, Jan. 2011.
- [33] F. Giulii Capponi, G. De Donato, F. Caricchi, "Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 48, no. 6, pp. 2190-2205, Nov./Dec. 2012.
- [34] E. Spooner, and B J. Chalmers, "Toroidally-wound, slotless, axial-flux, permanent-magnet, brushless-DC motors" in *Proc. ICEM*, Pisa, Italy, Sept. 12-14, 1988.

- [35] F. Caricchi, F. Crescimbin, E. Fedeli, and G. Noioa, "Design and Construction of a Wheel-Directly-Coupled Axial-Flux PM Motor Prototype for EVs", in *Proc. IEEE IAS Annual Meeting*, Denver, Colorado, USA, Oct. 02-06, 1994.
- [36] K.M. Rahman, N.R. Patel, T.G. Ward, J.M. Nagashima, F. Caricchi, and F. Crescimbin, "Application of direct-drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid electric vehicle propulsion system", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 42, no. 5, pp. 1185-1192, Sept./Oct. 2006.
- [37] Y. Chen, and P. Pillay, "Axial-Flux PM Wind Generator with a Soft Magnetic Composite Core", *Conf. Rec. 40th IEEE IAS Annu. Meeting*, vol. 1, pp. 231-237, 2005.
- [38] J. Woolmer, and M.D. McCulloch, "Analysis of the Yokeless and Segmented Armature Machine", in *Proc. IEMDC*, Antalya, Turkey, May 03-05, 2007.
- [39] H. Vansompel, P. Sergent, and L. Dupré, "Optimized Design Considering the Mass Influence of an Axial Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator With Concentrated Pole Windings", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 46, no. 12, Dec. 2010.
- [40] F. Caricchi, F. Crescimbin, O. Honorati, G. Bianco, E. Santini, "Performance of coreless-winding axial-flux permanent-magnet generator with power output at 400 Hz, 3000 r/min", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 34, pp. 1263-1269, Nov.-Dec., 1998.
- [41] H.C. Lovatt, V.S. Ramsden, and B.C. Mecrow, "Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle", *Proc. IEE-B*, vol. 145, no. 5, pp. 402-408, 1998.
- [42] N.F. Lombard, and M. J. Kamper, "Analysis and Performance of an Ironless Stator Axial Flux PM Machine", *IEEE Trans. on Energ. Conv.*, vol. 14, no. 4, Dec. 1999.
- [43] R.-J. Wang, M. J. Kamper, K. Van der Westhuizen, and J. F. Gieras, "Optimal design of a coreless stator axial flux permanent magnet generator", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 55-64, January 2005.
- [44] L. D. Ferraro, F. G. Capponi, R. Terrigi, F. Caricchi, and O. Honorati, "Ironless axial flux PM machine with active mechanical flux weakening for automotive applications", *Proc. IEEE Industry Applications Conf.*, pp. 1-6, 2006.
- [45] F. Caricchi, F. Crescimbin, F. Mezzetti, and E. Santini, "Multistage Axial-Flux PM Machine for Wheel Direct Drive", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 32, no. 4, Jul/Aug 1996.
- [46] F. Feudale, A. Odorico, M. Sica, F. Caricchi, F. G. Capponi, and F. Crescimbin, "Multi-stage Axial-Flux PM Machine for Direct-Drive Railway Traction Application", *Ship Propulsion and Railway Traction Systems Conference*, Bologna, Italy, Oct. 2005.
- [47] P. Anpalahan, and M. Lamperth, "Design of multi-stack axial flux permanent magnet generator for a hybrid electric vehicle", in *Proc. VPPC*, Windsor, UK, Sept. 06-08, 2006.
- [48] M. Lamperth, and P. Anpalahan, "Electrical Machine", U.S. Patent 8 022 593 B2, Sep. 20, 2011.
- [49] Z. Zhang, F. Profumo, and A. Tesconi, "Axial Flux Interior PM Synchronous Motor Torque Performance Analysis For Traction Drives", *IEE Japan*, vol. 116-D, no. 12, 1996.
- [50] F. Profumo, A. Tesconi, Z. Zhang, and A. Cavagnino, "Novel axial flux interior PM synchronous motor realized with powdered soft magnetic materials", in *Proc. IEEE IAS*, St. Louis, Missouri, Oct. 12-15, 1998.
- [51] T. Arakawa, M. Takemoto, S. Ogasawara, K. Inoue, O. Ozaki, H. Hojo, and H. Mitani, "Examination of an Interior Permanent Magnet Type Axial Gap Motor for the Hybrid Electric Vehicle", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 3602-3605, Oct. 2011.
- [52] E. Bommé, "Modélisation et Optimisation des Machines Electriques Discoïdes à Double Entrefer", PhD Thesis, INP Grenoble, Dec. 2009.
- [53] J. Saint-Michiel, and A. Abou-Akar, "Discoid machine", U.S. Patent 6 833 647, Dec. 21, 2004.
- [54] Y. Minagawa, "Axial gap motor", U.S. Patent 7 315 102, Jan. 1, 2008.
- [55] M. Aydin, and M.K. Guven, "Axial-flux electric machine", U.S. Patent 7 557 482, Jul. 7, 2009.
- [56] H. Atarashi, H. Isegawa, S. Abe, K. Yamamoto, and S. Tajima, "Axial gap motor", U.S. Patent 2010/0141075, June 10, 2010.
- [57] E. Odvarka, P. Anpalahan, N.L. Brown, R.J. Gray, A. Huntchinson, A. Mebarki, G. Saini, and K. Wejrzanowski, "Rotating electrical machine", U.S. Patent 2011/0260566, Oct. 27, 2011.

- [58] S. Grehant, "Contribution à l'Etude de Moteurs à Flux Transverse", Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble, Déc. 2003.
- [59] A. Babazadeh, N. Parspour, A. Hanifi, "Transverse Flux Machine for Direct Drive Robots: Modeling and Analysis," IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 2004.
- [60] Y. G. Guo, J. G. Zhu, P. A. Watterson and W. Wu "Development of a PM transverse flux motor with soft magnetic composite core", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 2, pp.426 -434, 2006.
- [61] J. Cros and P. Viarouge, "Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 17, no. 2, pp. 248–253, Jun. 2002.
- [62] N. Bianchi, and S. Bolognani "Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 38, no. 2, pp. 1259-1265, 2002.
- [63] F. Magnussen and C. Sadarangani, "Winding factors and Joule losses of permanent magnet machines with concentrated windings," in *Proc. IEEE-IEMDC*, Madison, WI, Jun. 2003, vol. 1, pp. 333–339.
- [64] F. Libert and J. Soulard, "Investigation on pole-slot combinations for permanent-magnet machines with concentrated windings," in *Proc. ICEM*, 2004, pp. 530–535.
- [65] A.M. EL-Refaie, "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, Jan. 2010
- [66] Z.Q. Zhu, "Fractional slot permanent magnet brushless machines and drives for electric and hybrid propulsion systems," *Int. Jour. for Comp. and Math. in Elec. and Elec. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp.9 – 31, 2011.