

ANNEXE B

REDUCTION DES COURANTS DE FOUCAULT

Tout élément conducteur, paramagnétique ou non, traversé par un champ magnétique d'amplitude variable est le siège de courants induits, appelés courants de Foucault. Il s'agit du phénomène exploité dans les actionneurs à induction ou asynchrones pour générer les efforts nécessaires à la mise en mouvement du rotor.

Dans certains cas, ces courants de Foucault ne sont pas désirés car, non seulement ils ne participent pas ou peu à l'effet utile, mais ils génèrent en plus des pertes par effet Joule. Il en est ainsi pour la plupart des circuits magnétiques parcourus par des champs magnétiques variables et en particulier pour les circuits magnétiques statoriques et rotoriques des actionneurs asynchrones.

Pour limiter l'apparition de ces courants indésirables, l'unique solution est de réduire la conductivité électrique des pièces constitutives de ces circuits magnétiques. Cependant, dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire de réduire la conductivité électrique dans toutes les directions. En effet, considérant que les courants sont toujours compris dans des plans perpendiculaires aux champs magnétiques qui les induisent (Fig. B.2), il suffit de réduire la conductivité dans une direction orthogonale au champ magnétique pour diminuer les courants de Foucault. Ainsi, dans les cas, les plus fréquents, où les lignes de champ associées au champ magnétique définissent des surfaces planes et parallèles, il ne sera nécessaire de réduire la conductivité électrique que dans une seule direction.

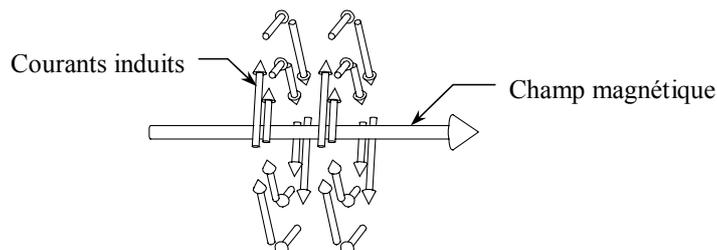


Fig. B.1. Courants induits par un champ magnétique rectiligne d'amplitude variable

Dans les actionneurs asynchrones classiques, par exemple, les lignes de champ magnétique sont toutes comprises, aux effets de bords près, dans des plans perpendiculaires à l'axe de rotation du moteur (Fig. B.2). Il suffit donc, pour diminuer les pertes par courants de Foucault dans le stator et le rotor, de réduire la conductivité électrique dans la direction axiale.

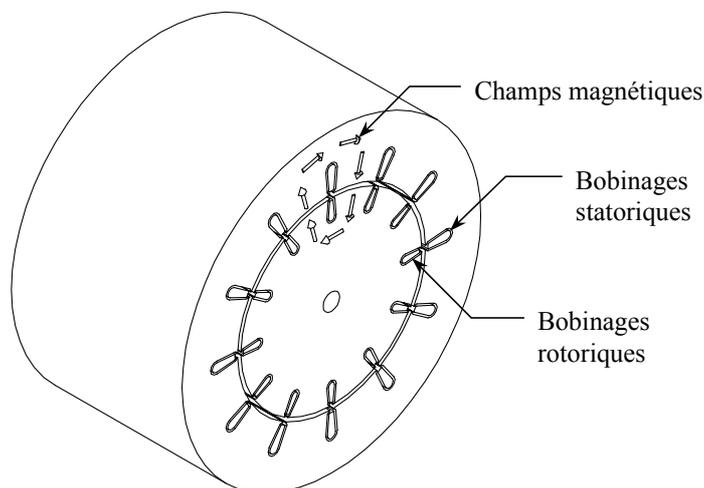


Fig. B.2. Répartition des lignes de champ au sein d'un actionneur asynchrone classique

Deux types de solutions sont possibles pour réduire la conductivité électrique des circuits magnétiques. La première consiste à utiliser des matériaux présentant à la fois une bonne perméabilité magnétique et une résistivité électrique élevée, mais les matériaux actuellement disponibles (cf. Annexe H), tels que les aciers au silicium, n'offrent pas encore entière satisfaction. La seconde consiste à réaliser le circuit magnétique à partir d'éléments distincts constitués d'un matériau magnétique à faible conductivité électrique et isolés électriquement les uns des autres.

Pour les moteurs asynchrones, comme pour la plupart des circuits magnétiques (moteurs, transformateurs, ...) où les champs magnétiques et les lignes de champs associées définissent des plans parallèles, la seconde solution est la plus répandue en raison de son efficacité et de son faible coût. Le circuit magnétique est réalisé à partir d'un empilement de tôles parallèles aux plans formés par les lignes de champ magnétique (Fig. B.3) et séparées les unes des autres par un isolant électrique. La solution n'est pas parfaite puisque de faibles courants de Foucault peuvent encore apparaître au sein même des tôles en raison de leur conductivité électrique non nulle. De ce point de vue il est donc préférable d'utiliser des tôles aussi minces que possible. Cependant, réduire l'épaisseur des tôles revient à en augmenter le nombre et, du même coup, le nombre de couches d'isolant. La proportion de matériau magnétique et la réluctance magnétique du circuit magnétique qui en dépend seront donc également diminuées pour affecter, in fine, les performances de la machine. Il faut donc trouver le juste équilibre entre la perte de rendement due aux courants de Foucault et celle due à l'augmentation de réluctance magnétique du circuit magnétique.

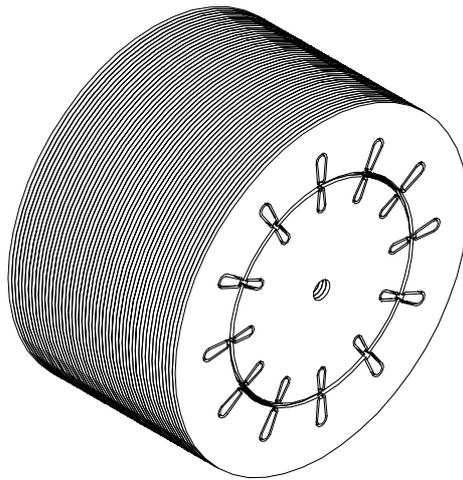


Fig. B.3. Circuit magnétique d'un actionneur asynchrone constitué d'un empilement de tôles

Dans le cas de notre actionneur, nous avons essentiellement trois circuits magnétiques :

- le circuit magnétique de l'inducteur à un degré de liberté ;
- le circuit magnétique de l'inducteur à deux degrés de liberté ;
- le circuit magnétique du rotor à dents.

a. Inducteur à un degré de liberté

Le cas de l'inducteur à un degré de liberté est très similaire à celui des actionneurs classiques puisque les lignes de champ magnétique sont comprises, en première approximation, dans des plans parallèles. En réalité ces plans ne sont pas strictement parallèles mais possèdent comme intersection commune un axe passant par le centre du rotor.

Si l'approximation de plans parallèles est valable, autrement dit si l'ouverture angulaire de l'inducteur n'est pas trop importante, le circuit magnétique peut être réalisé par l'empilement de tôles d'épaisseur constante (Fig. B.4 -a- et -b-).

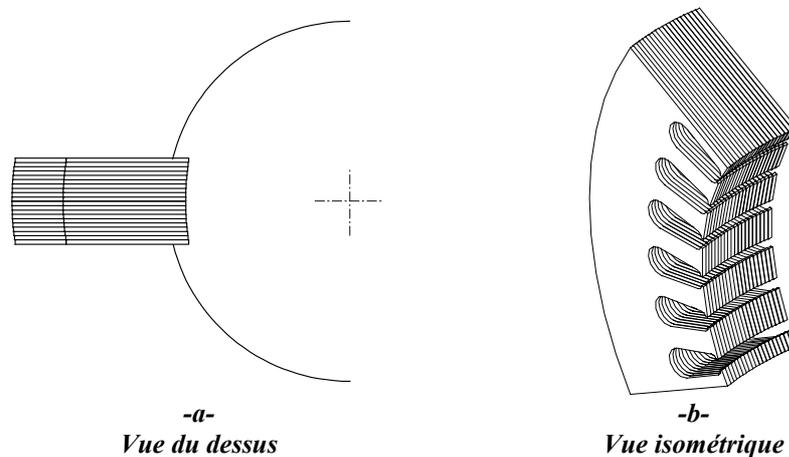


Fig. B.4. Inducteur à un degré de liberté constitué de tôles d'épaisseur constante

Dans le cas contraire, les tôles devront présenter une épaisseur variable de sorte qu'une fois empilées le plan médian de chacune d'elles corresponde à celui contenant les lignes de champ magnétique (Fig. B.5 -a- et -b-).

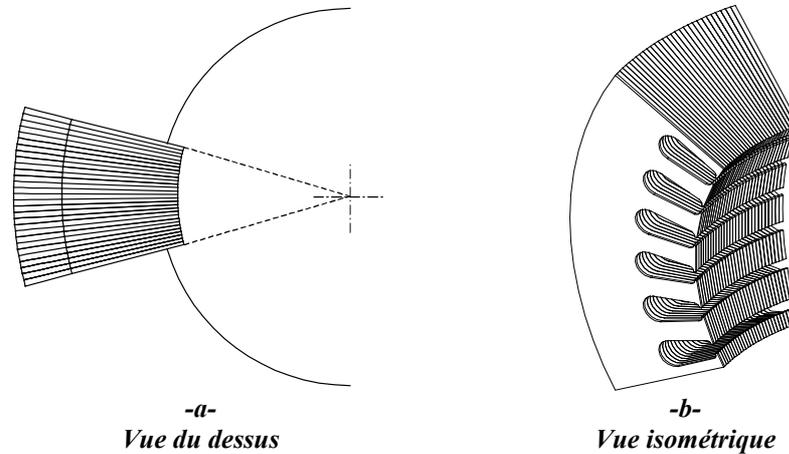


Fig. B.5. Inducteur à un degré de liberté constitué de tôles d'épaisseur non constante

b. Inducteur à deux degrés de liberté

Afin de mieux visualiser la répartition des champs magnétiques au sein de l'inducteur à deux degrés de liberté, nous avons décidé de porter notre réflexion sur une structure plane plutôt que sphérique (Fig. B.6).

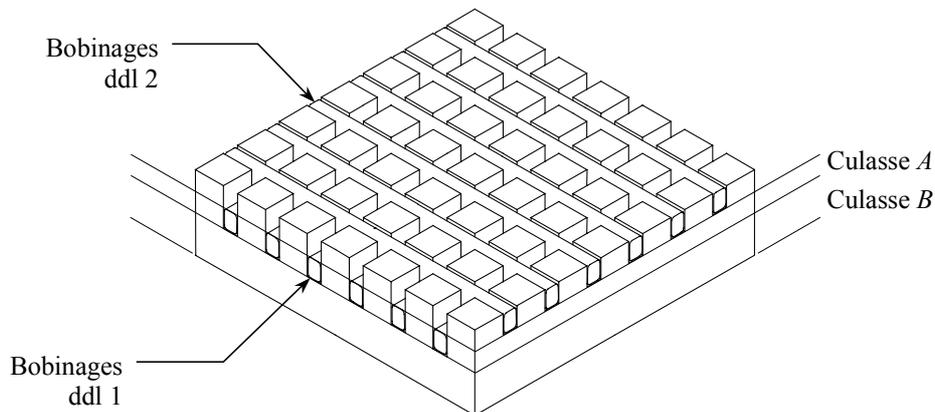


Fig. B.6. Inducteur à deux degrés de liberté ramené à un cas plan

Les choses sont plus complexes pour cet inducteur car, pour chacun des deux degrés de liberté, les lignes de champ magnétique définissent deux séries perpendiculaires de plans parallèles (Fig. B.7 -a- et -b-). De plus, les champs magnétiques générés par les bobinages actionnant le premier degré de liberté (ddl 1) effectuent leur retour au niveau de la culasse B uniquement, tandis que ceux générés par les bobinages actionnant le second degré de liberté (ddl 2) passent à la fois au travers des culasses A et B. Les champs magnétiques résultant de la combinaison des deux degrés de liberté, et les lignes

de champs associées, définissent donc, au niveau de la culasse B , des plans parallèles mais de direction variable. Pour réduire les courants de Foucault, il faudrait alors diminuer la conductivité dans plusieurs directions, ce qui ne peut plus être obtenu à partir d'un simple empilement de tôles.

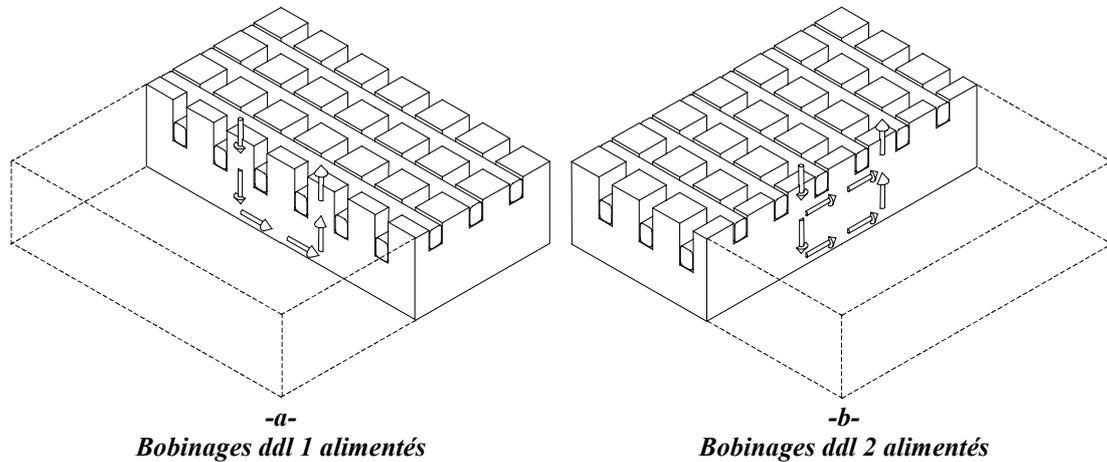


Fig. B.7. Distribution des champs magnétiques dans l'inducteur à deux degrés de liberté

Pour contourner ce problème, une solution consiste à modifier le circuit magnétique de sorte que les champs magnétiques ne viennent plus à se superposer là où ils ont des directions différentes, à savoir dans la culasse B . Pour cela, il faut empêcher le champ magnétique généré par les bobinages ddl 2 d'y circuler en pratiquant des ouvertures longitudinales (Fig. B.8 -a-). Ces ouvertures de section rectangulaire doivent avoir la hauteur de la culasse, la largeur des encoches statoriques et être alignées avec les encoches des bobinages ddl 2. De cette manière, les champs magnétiques produits par les bobinages ddl 2 sont bloqués efficacement sans pour autant dévier les champs magnétiques produits par l'autre série de bobinages (Fig. B.8 -b-).

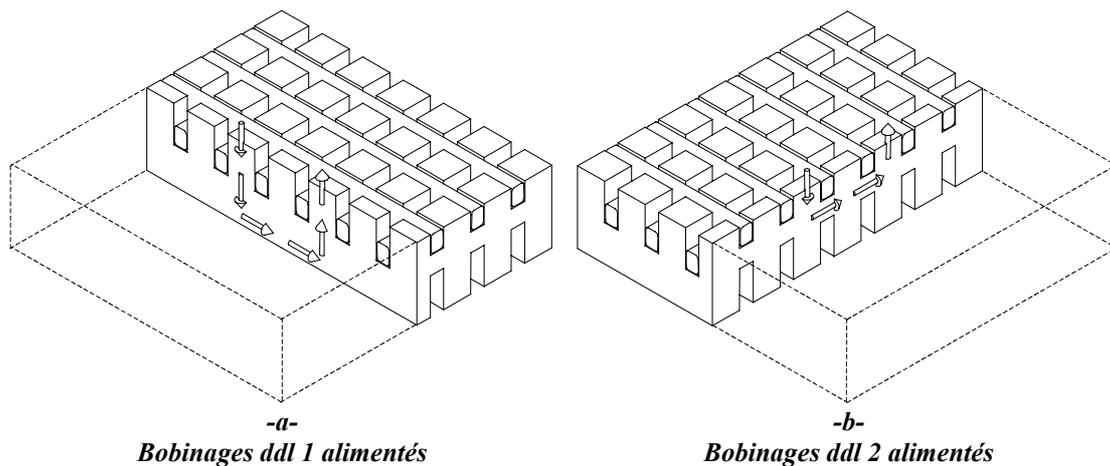


Fig. B.8. Distribution des champs magnétiques dans l'inducteur à deux degrés de liberté

Sous cette forme, le circuit magnétique peut être subdivisé en deux couches dont les lignes de champ définissent deux séries de plans parallèles. La première couche, constituée de la culasse B , est traversée par les champs magnétiques des bobinages

ddl 1. Les lignes de champ y définissent des plans parallèles aux bobinages ddl 2 (Fig. B.8 -b-). La seconde couche, constituée des dents statoriques ainsi que de la culasse *A*, est traversée par les champs magnétiques des bobinages ddl 1 et 2. Les lignes de champ y définissent des plans parallèles aux bobinages ddl 1 (Fig. B.8 -a-).

Suivant le même raisonnement que pour les actionneurs classiques, ces deux parties peuvent être réalisées à partir d'un empilement de tôles parallèles aux plans définis par les lignes de champ et d'épaisseur constante (Fig. B.9).

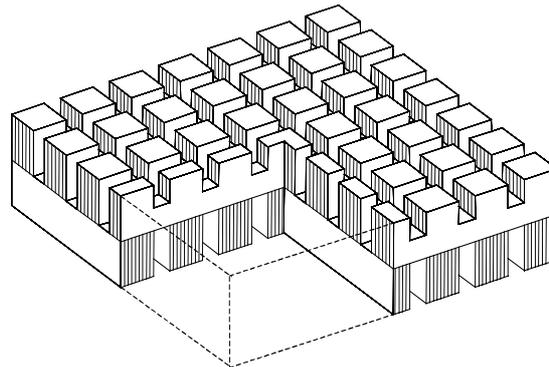


Fig. B.9. Circuit magnétique de l'inducteur à deux degrés de liberté plan réalisé à partir de tôles

Toutefois, ceci reste valable uniquement pour une géométrie plane ou en première approximation pour des ouvertures angulaires réduites de l'inducteur (cf. supra). Dans le cas contraire, les tôles doivent avoir une épaisseur variable de sorte qu'une fois empilées le plan médian de chacune d'elles corresponde à celui défini par les lignes de champ magnétique (Fig. B.10).

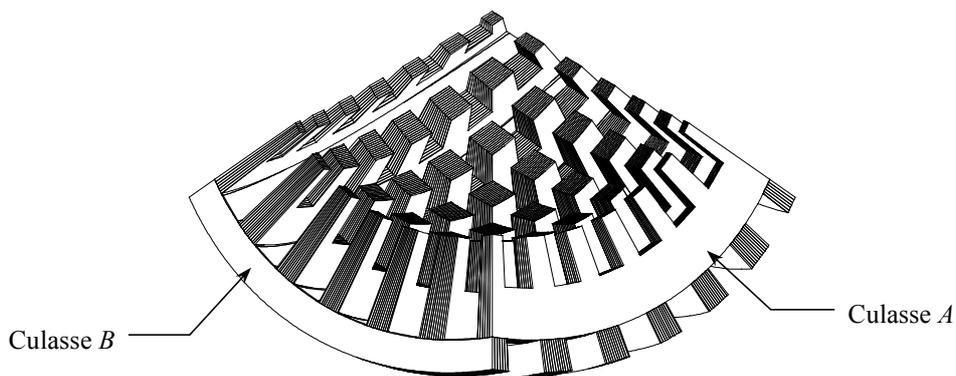


Fig. B.10. Circuit magnétique de l'inducteur à deux degrés de liberté sphérique réalisé à partir de tôles

c. Rotor à dents

Tout comme pour l'inducteur à deux degrés de liberté, nous avons considéré, dans un premier temps, un élément du rotor ramené à un cas plan (Fig. B.11) afin de mieux visualiser la distribution des champs magnétiques. Les conclusions seront ensuite généralisées au cas d'une structure sphérique.

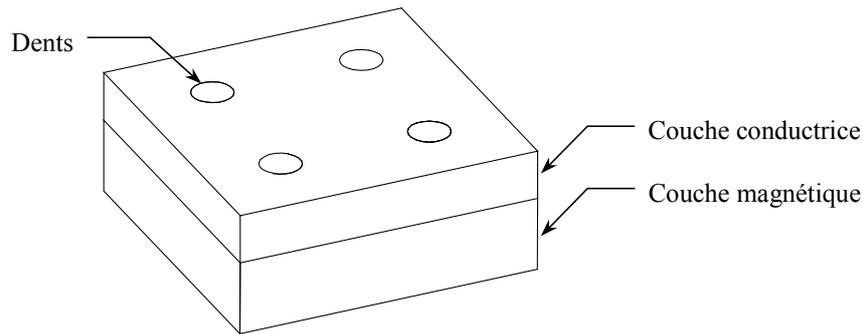


Fig. B.11. Élément du rotor ramené à un cas plan

Suivant l'orientation de cet élément de rotor sous les inducteurs, nous pouvons avoir différentes configurations de la distribution des champs magnétiques (Fig. B.12 -a- et -b-).

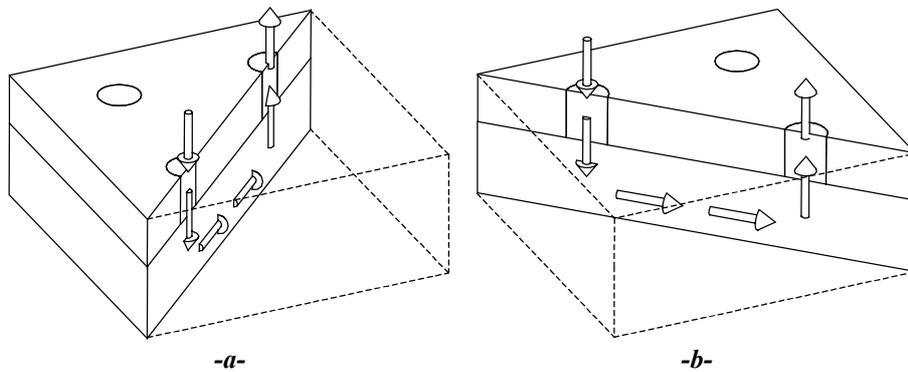


Fig. B.12. Possibles distributions des champs magnétiques dans le rotor

Dans chacun des deux cas, les lignes de champs définissent une série de plans parallèles. L'élimination, ou tout du moins, la réduction des courants de Foucault dans la couche magnétique pourrait donc être obtenue en la réalisant à partir de tôles empilées (Fig. B.13 -a- et -b-).

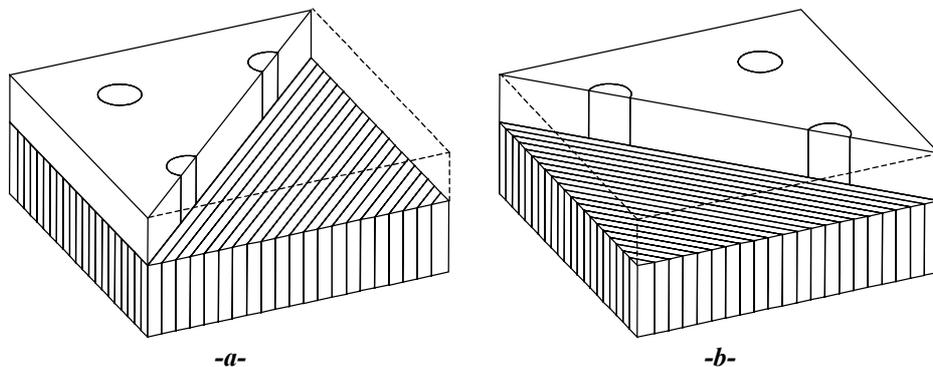


Fig. B.13. Possibilités de réalisation de la couche magnétique du rotor à partir de tôles

Il n'existe donc pas d'agencement de tôles permettant de réduire les courants de Foucault pour toutes les positions du rotor car, pour y parvenir, il faut isoler électriquement la couche magnétique dans toutes les directions du plan du rotor. Une première solution permettant de réaliser cette isolation consisterait à utiliser des "aiguilles" pour former la couche magnétique (Fig. B.14).

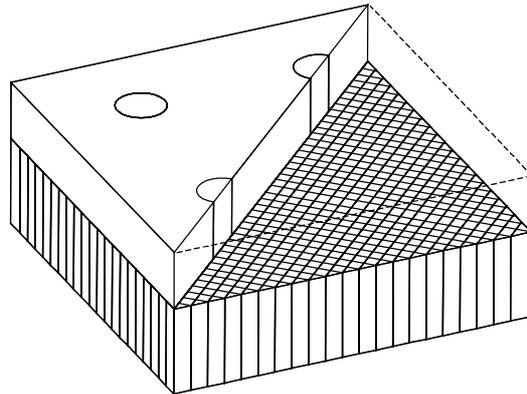


Fig. B.14. Réalisation de la couche magnétique du rotor à partir d'aiguilles

Réaliser la couche magnétique du rotor à partir d'aiguilles est envisageable d'un point de vue pratique dans le cas plan que nous avons considéré. Par contre, dans le cas sphérique qui nous intéresse, ce genre d'exécution est beaucoup moins réaliste. Il faudrait en effet utiliser des aiguilles de section variable, un vrai casse-tête pour leur fabrication et leur assemblage.

Une solution plus concevable est de former cette couche magnétique à partir de poudres magnétiques dont chaque particule est isolée électriquement (Fig. B.15). En effet, ces poudres peuvent remplir pleinement le rôle des aiguilles tout en offrant la possibilité de fabriquer la couche magnétique, sphérique ou non, par "simple" compression.

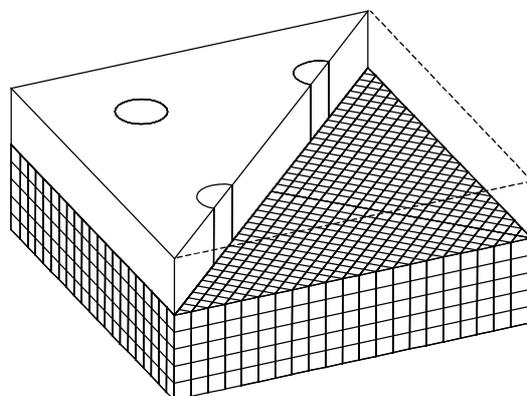


Fig. B.15. Réalisation de la couche magnétique du rotor à partir de poudre

Enfin, en ce qui concerne les dents, les champs magnétiques les traversant sont alignés avec leur axe. Les pertes par courants de Foucault peuvent donc être réduites en les réalisant :

- par empilement de tôles magnétiques (Fig. B.16 -a-);
- par enroulement de tôles magnétiques (Fig. B.16 -b-);
- par compaction de poudres magnétiques ;

les deux dernières étant sans nul doute les plus pratiques.

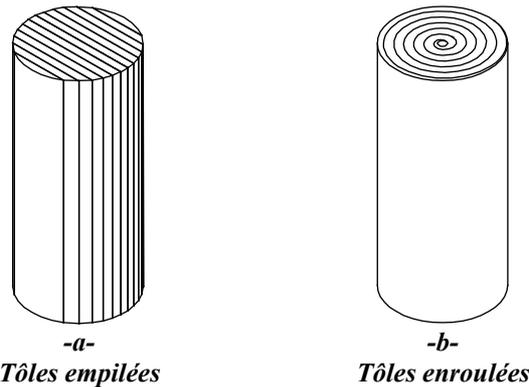


Fig. B.16. Possibilités de réalisation des dents rotoriques

Il faut encore faire remarquer qu'au prix de pertes plus élevées, les dents rotoriques ainsi que toutes les autres pièces magnétiques de notre actionneur (inducteurs et couche magnétique du rotor) peuvent être réalisées beaucoup plus facilement dans un matériau tel que l'acier au silicium, ayant à la fois une bonne perméabilité magnétique et une résistivité électrique élevée.

