

TP N°1 : ÉTUDE D'UN CIRCUIT MAGNÉTIQUE À ARMATURE MOBILE

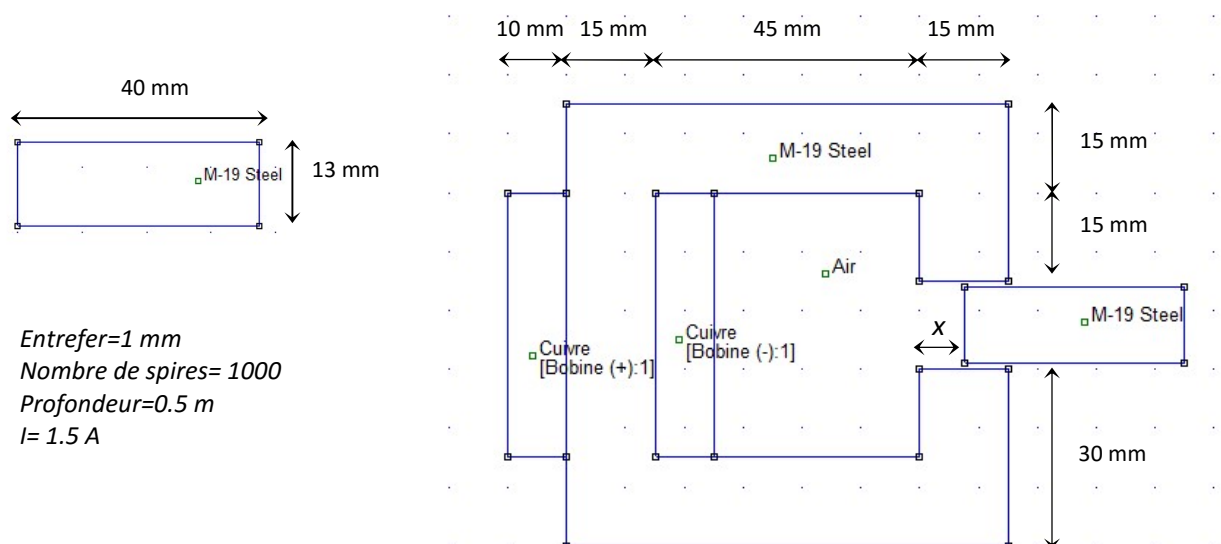
A. But de TP

L'objectif de ce TP est d'étudier le comportement d'un circuit magnétique à armature mobile, et de tracer ses caractéristiques électromagnétiques par une modélisation par éléments finis.

B. Analyse par éléments finis

Manipulation : Les caractéristiques géométriques sont données ci-dessous, il faut suivre les opérations :

- Définition de la géométrie.
- Affectation de matériaux pour chaque région du problème.
- Définition du problème.
- Définition des conditions aux limites.
- Le maillage de la géométrie de la machine en éléments finis.
- La résolution du problème.



C. Travail demandé

- 1- Tracer la variation de l'induction magnétique pour un contour défini dans l'entrefer.
- 2- Tracer les lignes du flux magnétique pour $x=0$ mm, $x=3$ mm, $x=7.5$ mm et $x=15$ mm,
- 3- Pour $x=0$ mm et $x=15$ mm, calculer les valeurs de l'induction magnétique dans l'entrefer (inclure aussi les résultats théoriques).
- 4- Calculer l'énergie magnétique dans les différentes parties du circuit magnétique.
- 5- Tracer la caractéristique de l'induction magnétique pour un contour défini dans l'entrefer en fonction de la position de l'armature mobile (Pas à pas de 1 mm).
- 6- Tracer la caractéristique de l'inductance en fonction de la position de l'armature mobile (Pas à pas de 1 mm).
- 7- Tracer la force appliquée à l'armature mobile en fonction de la position de l'armature mobile donnée (Pas à pas de 1 mm).
- 8- Conclusion générale.

Notez bien : inclure les tableaux des résultats obtenus dans le compte rendu du TP.

TP N°2 : ÉTUDE D'UNE MRV MONOPHASÉE

A. But de TP

L'objectif de ce TP est d'étudier le comportement d'une structure élémentaire d'une machine à réluctance variable à courant imposé, et de tracer ses caractéristiques électromagnétiques par une modélisation par éléments finis.

B. Principe de fonctionnement de la MRV

Le stator d'une MRV est constitué de plusieurs phases électriquement indépendantes. Le rotor de la machine ne comporte aucun enroulement. Chaque phase est constituée par deux enroulements mis en série autour des pôles statoriques diamétralement opposés. Une structure élémentaire avec une phase est représentée sur la figure 1.

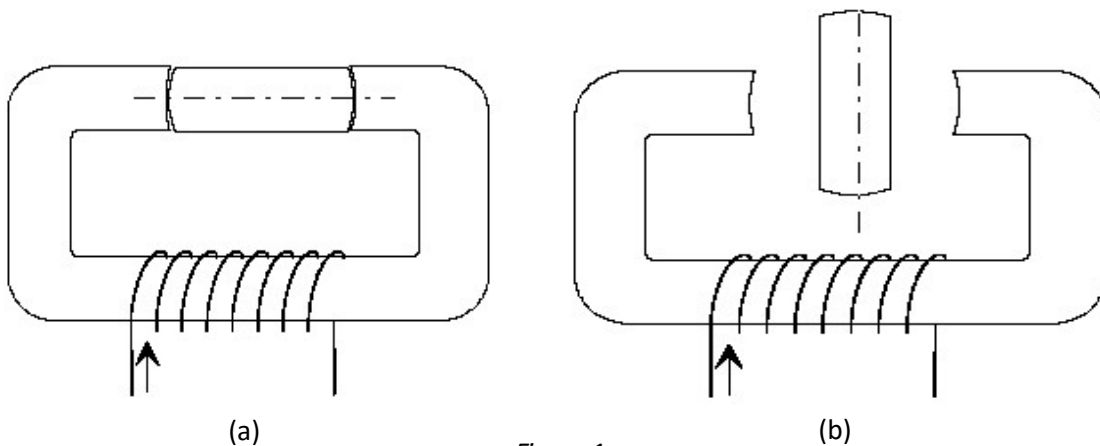


Figure 1

Le principe de fonctionnement d'une MRV est celui de l'électro-aimant : lorsqu'une phase est alimentée elle attire le rotor qui tend à tourner pour s'aligner sur cette phase afin de maximiser le flux. Ainsi, deux positions particulières peuvent être distinguées :

- **La position de conjonction** (figure 1.a) : pour laquelle les axes des dents statoriques et rotoriques sont alignés. Dans cette position l'inductance de la phase alimentée est maximale (position de flux maximum).
- **La position d'opposition** (figure 1.b) : quand l'axe de la dent rotorique est disposé de façon à rendre l'inductance minimale. Cette inductance est minimale autour de la position d'opposition. Elle croît lorsque les dents rotoriques et statoriques se rapprochent et décroît lorsqu'elles s'éloignent.

C. Analyse par éléments finis d'une MRV monophasée

Les caractéristiques géométriques sont données sur la figure 2, il faut suivre les opérations :

- Définition du problème.
- Définition de la géométrie.
- Affectation de matériaux pour chaque région du problème.
- Définition des conditions aux limites.
- Le maillage de la géométrie de la machine en éléments finies.
- La résolution du problème.

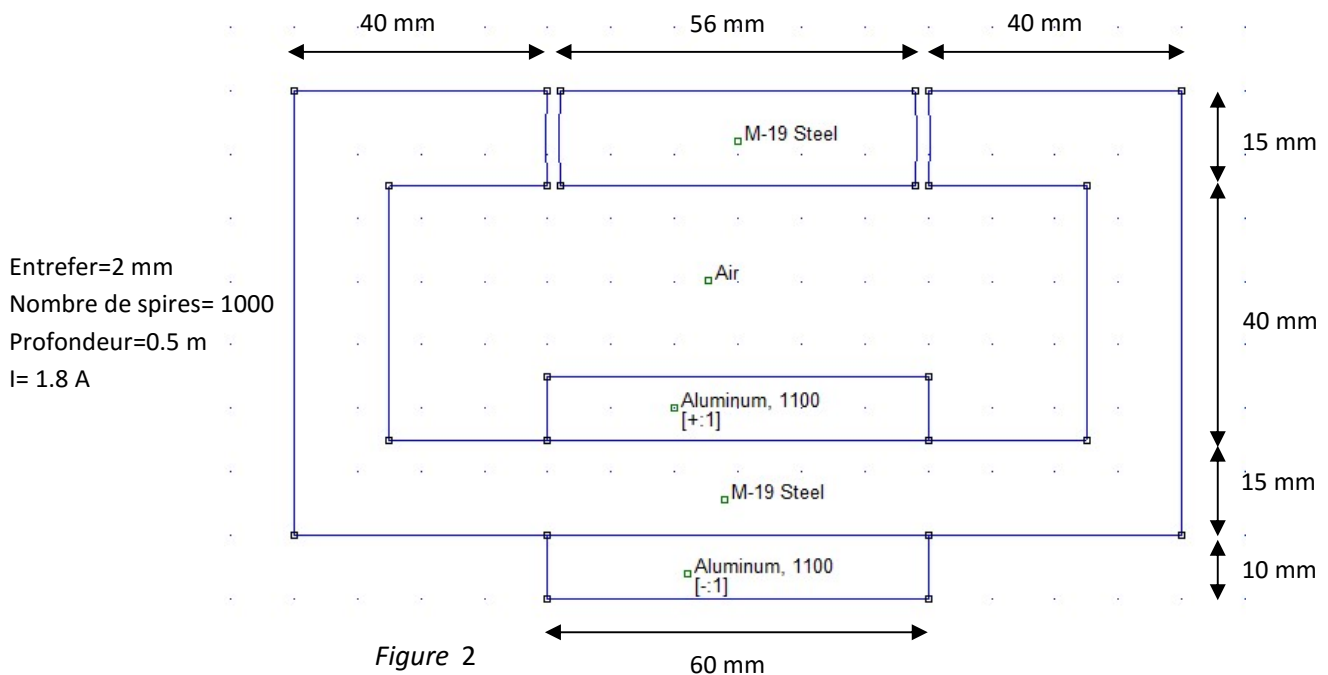


Figure 2

D. Travail demandé

- 1- Tracez la variation de l'induction magnétique ainsi que les lignes de flux pour un contour défini dans l'entrefer pour les deux cas de la figure 1.
- 2- Pour un pas de 45° (commencez par 0), calculer les valeurs de l'induction magnétique dans l'entrefer (inclure aussi les résultats théoriques).
- 3- Calculez l'énergie magnétique dans les différentes parties du circuit magnétique pour les deux cas de la figure 1.
- 4- Tracez la caractéristique de l'induction magnétique pour un contour défini dans l'entrefer en fonction de la position de l'armature mobile (pour un pas de 5°), que constatez-vous ?
- 5- Tracez la force appliquée à l'armature mobile en fonction de la position de l'armature mobile donnée (pour un pas de 5°).
- 6- Tracez la caractéristique de l'inductance en fonction de la position de l'armature mobile (pour un pas de 5°).
- 7- Citez les remarques les plus importantes que vous pouvez tirer de ce TP dans votre conclusion.

Notez bien : inclure les tableaux des résultats obtenus dans le compte rendu du TP.

TP N°3 : SIMULATION DE LA MACHINE À RÉLUCTANCE VARIABLE (MRV TRIPHASÉE)

1- But de la manipulation

L'objectif de ce TP est d'étudier le comportement d'une machine à réluctance variable à courant imposé et de tracer ses caractéristiques électromagnétiques par une modélisation par éléments finis.

2- Principe du moteur à réluctance variable

La MRV est la machine la plus simple en construction, sa structure est composée de :

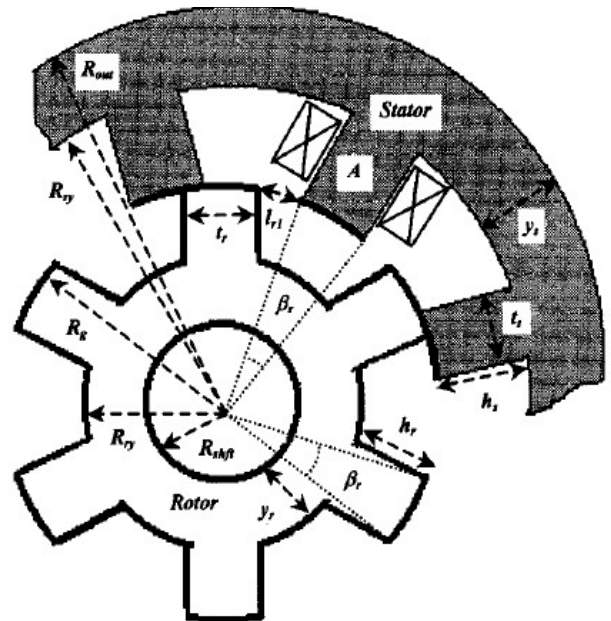
- Un stator qui est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques présentant N_s pôles saillants, appelés dents statoriques, avec un bobinage formant les phases statoriques. Chaque pôle comporte n_s spires.
- Un rotor qui est constitué de tôles ferromagnétiques, présentant N_r pôles rotoriques non bobinés.

3- Analyse par éléments finis de la MRV

Manipulation : Les caractéristiques géométriques sont données ci-dessous, il faut suivre les opérations :

- Définition de la géométrie.
- Affectation de matériaux pour chaque région du problème.
- Définition du problème.
- Définition des conditions aux limites.
- Le maillage de la géométrie de la machine en éléments finis.
- La résolution du problème.

| | | |
|-------------------------------|---------------------|-------|
| Diamètre extérieur du stator | D_{out} | 76 |
| Diamètre extérieur du rotor | D_g | 40.6 |
| Diamètre de l'arbre | D_{shft} | 18 |
| Longueur active de fer | l | 50.8 |
| Longueur de l'entrefer | e | 0.25 |
| Hauteur de la dent statorique | h_s | 10.45 |
| Hauteur de la dent rotorique | h_r | 7.3 |
| Largeur de la dent statorique | $\beta_s \quad t_s$ | 22.5 |
| Largeur de la dent rotorique | $\beta_r \quad t_r$ | 22.8 |
| Nombre de spires par pôle | n_s | 35 |
| Nombre de pôles statoriques | N_s | 8 |
| Nombre de pôles rotoriques | N_r | 6 |
| Courant maximal | I_{max} | 40 |



4- Travail demandé

- a. Tracez les lignes de flux pour le cas de conjonction, ainsi que pour le cas d'opposition.
- b. Tracez la caractéristique de flux magnétique en fonction du courant d'excitation à position rotorique donnée (pour un pas de 5°).
- c. Tracez la caractéristique de l'inductance en fonction de la position rotorique (pour un pas de 5°).
- d. Tracez la caractéristique du couple en fonction de la position rotorique (pour un pas de 5°).
- e. Conclusion générale.

Notez bien : inclure les tableaux des résultats obtenus dans le compte rendu du TP.

TP N°4

MACHINE ASYNCHRONE MONOPHASÉE À CAGE

A. But du TP

Étude d'une machine asynchrone monophasée à phase auxiliaire capacitive et observation des différentes grandeurs entrant en interaction dans la machine. On insistera sur la phase de démarrage sachant que le moteur asynchrone monophasé ne démarre pas tout seul sans capacité de démarrage. Les données sont introduites dans le modèle d'une machine asynchrone dans l'environnement Simulink de Matlab.

B. Montages

On va réaliser deux montages relatifs au moteur monophasé à cage, le premier avec une capacité de démarrage, le deuxième avec une capacité de démarrage en plus d'une capacité permanente en série avec le bobinage auxiliaire (figures 1 et 2).

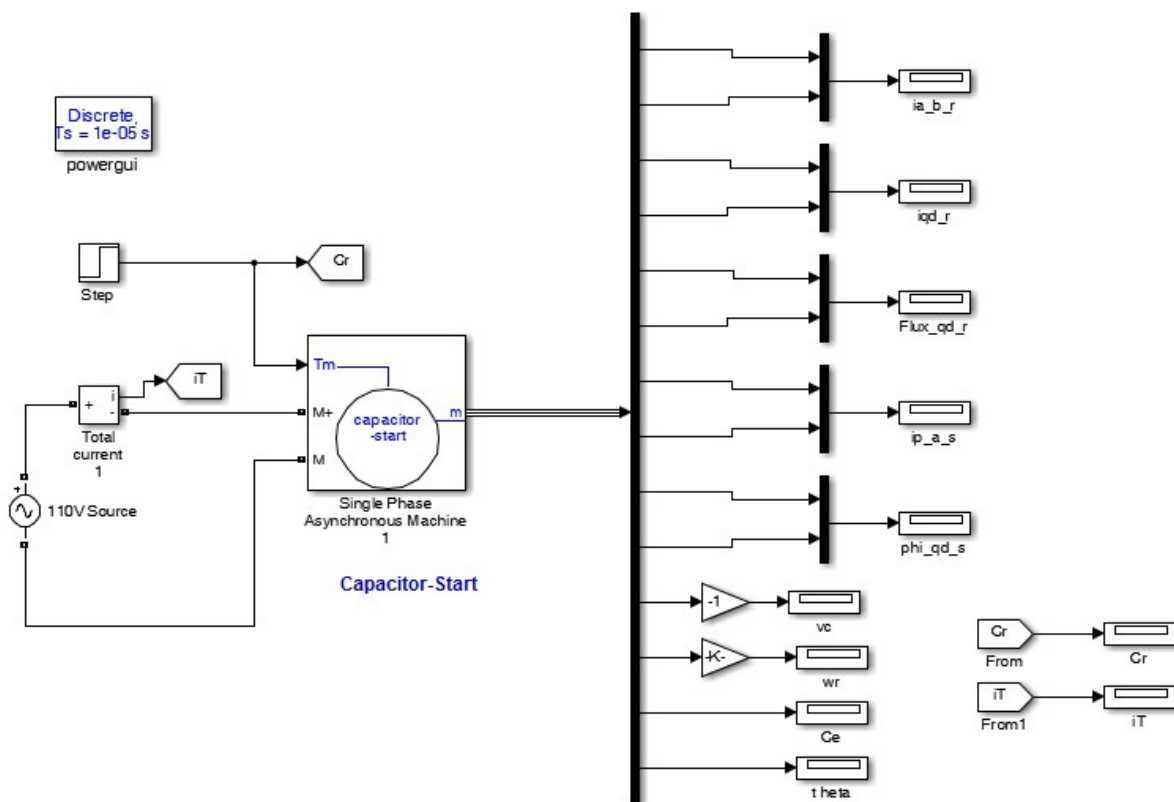


fig.1

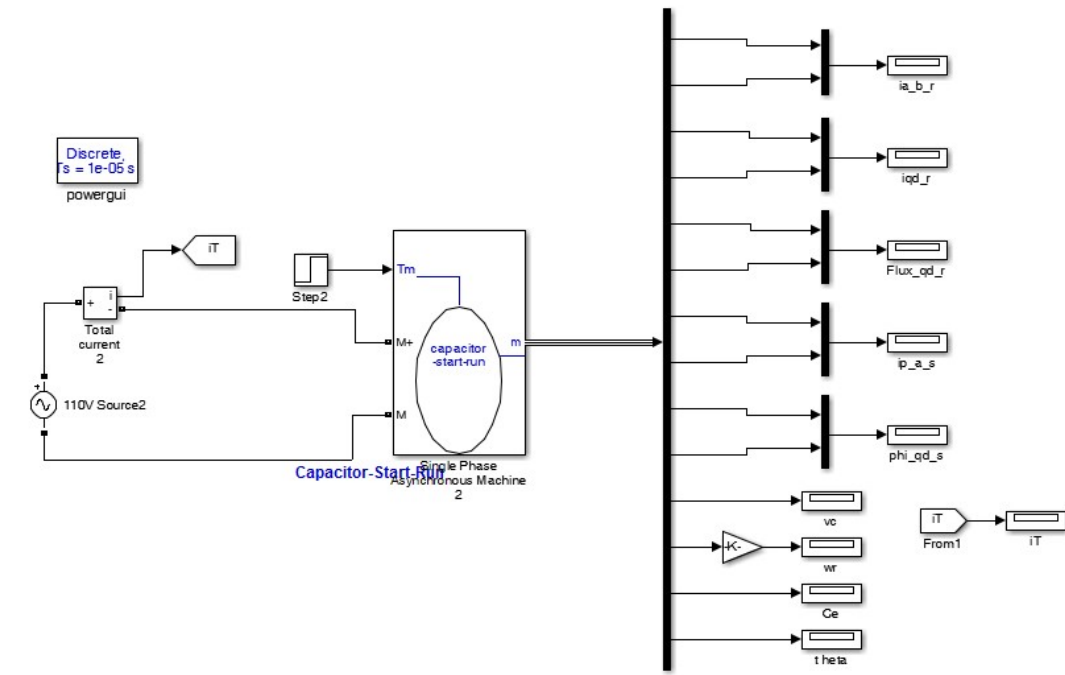


fig.2

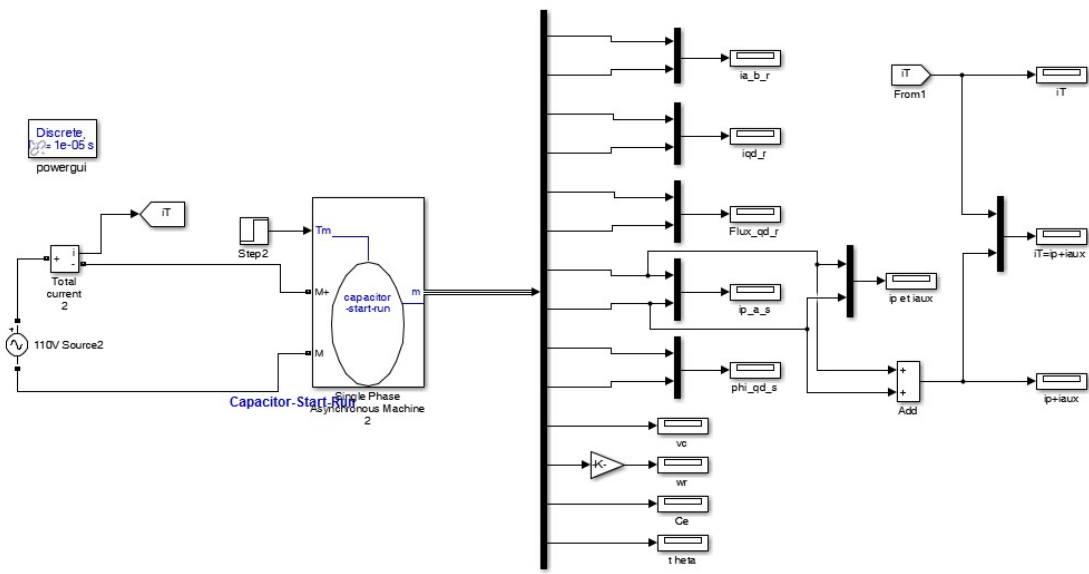


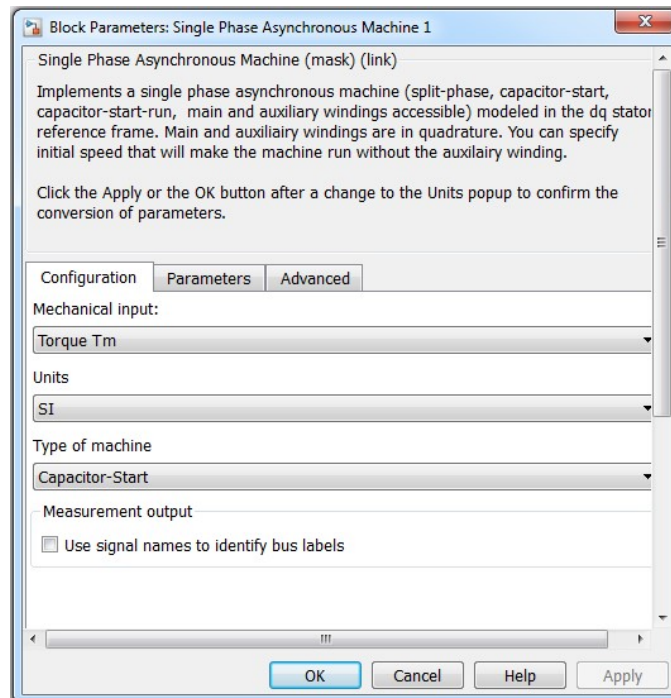
fig.3

Les montages se composent des éléments ci dessus dont les emplacements dans la bibliothèque de Matlab\Simulink sont indiqués comme suit :

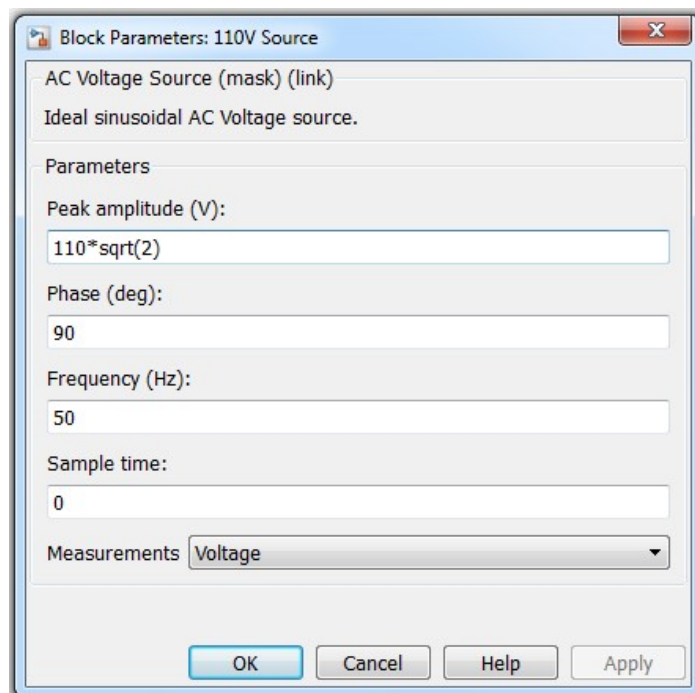
- Une source de tension monophasée alternative \Rightarrow Simcape \Rightarrow SimPowerSystems/SpecializedTechnology/Electrical Source/AC Voltage Source.
- Une machine asynchrone monophasée \Rightarrow Simcape \Rightarrow SimPowerSystems/SpecializedTechnology/Machines/Single Phase Asynchronous Machine.
- Un bloc de mesure de courant \Rightarrow Simcape \Rightarrow SimPowerSystems/SpecializedTechnology/Measurement/Current Measurement.
- Des blocs Powergui, Mux, Demux, Step, Gain, Goto, From, Scope.

C. Travail demandé

- **Réalisation du montage de la figure 1.**
- Configurez la machine comme décrit sur la fenêtre Block Parameters.



- Configurez la source de tension comme décrit sur la fenêtre Block Parameters.

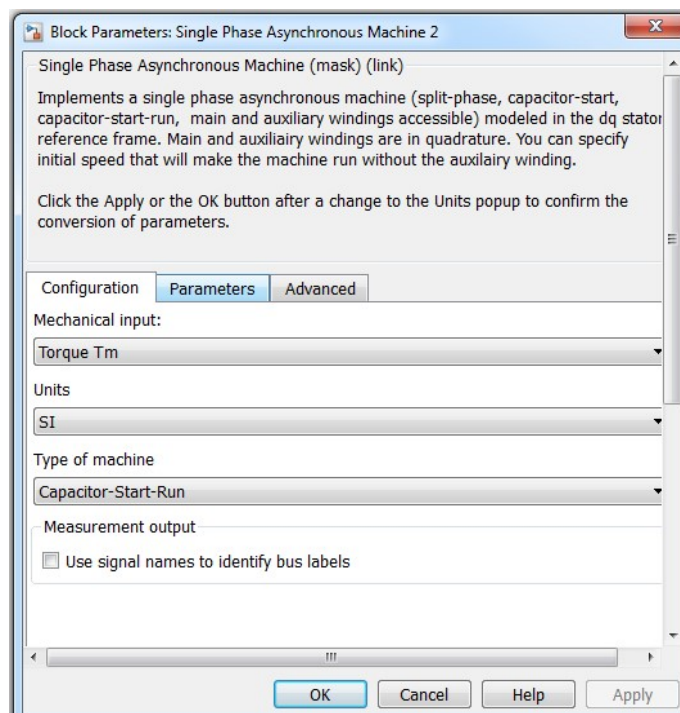


- La simulation suppose que la machine démarre à vide, à l'instant 1.2 s, on applique un couple résistant de 1N.m, on prend par exemple un temps de simulation de 3 s.

1. Relevez les courbes des courants i_T , i_p , i_{aux} , de la tension aux bornes de la capacité V_C , du couple électromagnétique C_{em} , de la vitesse de rotation w_r , ainsi que le flux Φ etc.
2. Visualiser sur deux périodes, ensemble, les deux courants i_p , et i_{aux} , pour pouvoir calculer leur déphasage.
3. Interpréter les résultats.
4. Conclusion.

➤ **Réalisation du montage de la figure 2.**

- Configurez la machine comme décrit sur la fenêtre Block Parameters.



- La source de tension reste configurée comme précédemment.
 - La simulation suppose que la machine démarre à vide, à l'instant 1.2 s, on applique un couple résistant de 1N.m, on prend par exemple un temps de simulation de 3 s.
1. Relevez les courbes des courants i_T , i_p , i_{aux} , de la tension aux bornes de la capacité V_C , du couple électromagnétique C_{em} , de la vitesse de rotation w_r , ainsi que le flux Φ etc.
 2. Visualiser sur deux périodes, ensemble, les deux courants i_p , et i_{aux} , pour pouvoir calculer leur déphasage. Commenter vos résultats.
 3. Comparer i_T avec la somme des courants i_p et i_{aux} .
 4. Interpréter les résultats.
 5. Conclusion.

TP N°5

ÉTUDE D'UN CIRCUIT MAGNÉTIQUE À AIMANT PERMANENT

1- But de TP

Actuellement, vu le développement des aimants permanents, en électrotechnique, nombreuses machines à base d'aimants permanents ont été construites (machine synchrone à aimant permanent, machine à barrières de flux, synchro-réductante machine, ...), alors, avant l'étude de n'importe quel type de machine à aimant permanent, une étude d'un circuit magnétique simple à aimant permanent se trouve indispensable pour la compréhension du comportement magnétique de l'aimant, ceci constitue le but de ce TP (sachant que l'étude de la machine synchrone à aimant permanent sera faite dans le prochain TP).

2- L'aimant permanent

➤ Il existe différents matériaux utilisés pour la fabrication des aimants permanents. Ils varient par leurs performances et aussi par leur coût. Tous utilisent une zone particulière du cycle d'hystérésis des matériaux ferromagnétique (figure 1). On utilise généralement des matériaux ayant une grande valeur de $B_{\text{rémanent}}$ et de $H_{\text{coercitif}}$.

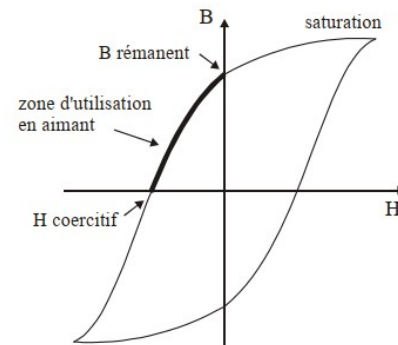


Figure -1-

- La figure 2 représente les caractéristiques de matériaux modernes utilisés pour les aimants, par comparaison à l'Alnico 5, leurs caractéristiques sont généralement linéaires.
- Les prix au kg varient dans un rapport 1 à 5 ou 1 à 10 entre les moins performants (Alnico 5) et les plus performants (Néodyme-Fer-Bore et Samarium-Cobalt).
- Pour minimiser le volume de l'aimant (et donc son coût), il faut choisir le produit $|B_a \cdot H_a|$ le plus grand possible, c'est le **critère d'Evershed**. Les constructeurs de matériaux donnent $|B_a \cdot H_a|_{\text{max}}$ (en j/m^3), appelé « énergie spécifique de l'aimant permanent ». (B_a : l'induction de l'aimant, H_a : champ coercitif de l'aimant).

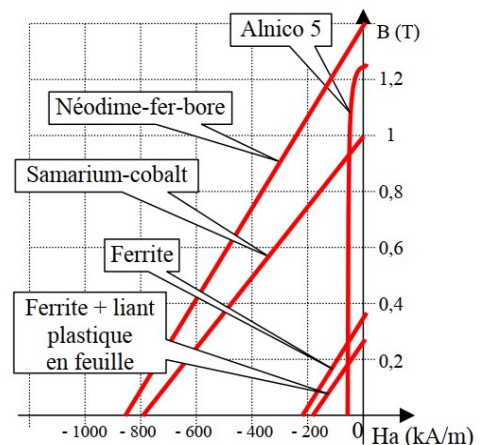


Figure -2-

3- Analyse par éléments finis du circuit magnétique à aimant permanent

Manipulation : Les caractéristiques géométriques sont données ci-dessous (figure 3), il faut suivre les opérations :

- Définition de la géométrie.
- Affectation de matériaux pour chaque région du problème.
- Définition du problème.
- Définition des conditions aux limites.
- Le maillage de la géométrie de la machine en éléments finis.
- La résolution du problème.

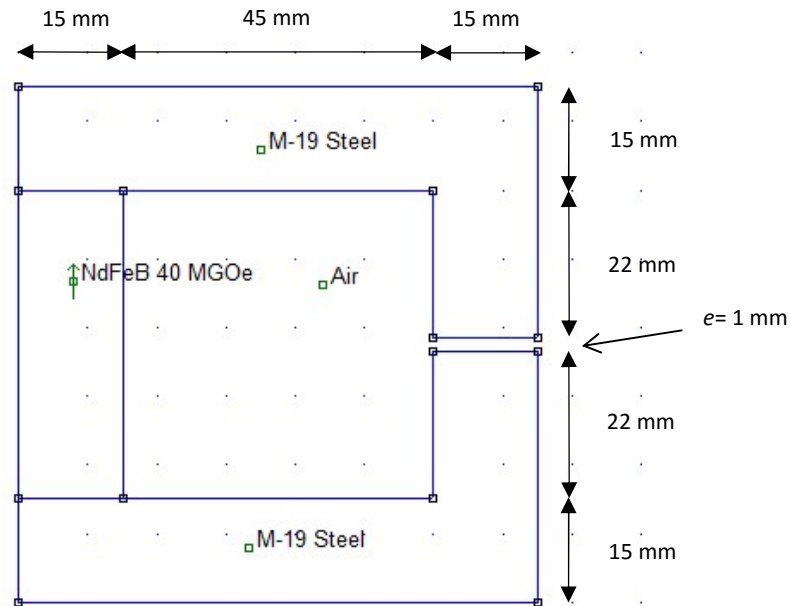


Figure -3-

4- Travail demandé

➤ **Partie n°1 : utilisation de l'Alnico 5 comme matériau de l'aimant permanent**

1. Tracer les lignes de flux magnétique.
2. Calculer la valeur de l'induction magnétique pour un contour défini dans l'entrefer, ainsi que les autres parties du circuit magnétique.
3. Calculer l'énergie magnétique dans les différentes parties du circuit magnétique.
4. Tracer la caractéristique de l'induction magnétique pour un contour défini dans l'entrefer en fonction de l'épaisseur de l'entrefer (Pour un pas de 0.5 mm).
5. Interpréter clairement les résultats obtenus.

➤ **Partie n°2 : utilisation du NdFeB 40 MGOe comme matériau de l'aimant permanent**

1. Remplir le tableau suivant, puis interpréter clairement les résultats obtenus.

| Matériau de l'aimant permanent | Alnico 5 | Alnico 8 | NdFeB 32 MGOe | NdFeB 40 MGOe | SmCo 20 MGOe | SmCo 27 MGOe | Ceramic 5 |
|---|----------|----------|---------------|---------------|--------------|--------------|-----------|
| L'induction magnétique pour un contour défini dans l'entrefer B_e (T) | | | | | | | |

2. En utilisant NdFeB 40 MGOe comme matériau de l'aimant permanent, remplir le tableau suivant :

| Longueur de l'aimant permanent (mm) | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| L'induction magnétique pour un contour défini dans l'entrefer B_e (T) | | | | | | | |

Que constater-vous pour les résultats obtenus.

3. Conclure en donnant des interprétations précises.

TP N°6

ÉTUDE D'UNE MACHINE À AIMANT PERMANENT

A. But de TP

Le fonctionnement de la machine à aimant permanent est directement lié à la distribution des lignes de champ magnétique au sein de sa structure, donc on va étudier un modèle magnétostatique à deux dimensions de la machine à aimant permanent en utilisant la modélisation par la méthode des éléments finis.

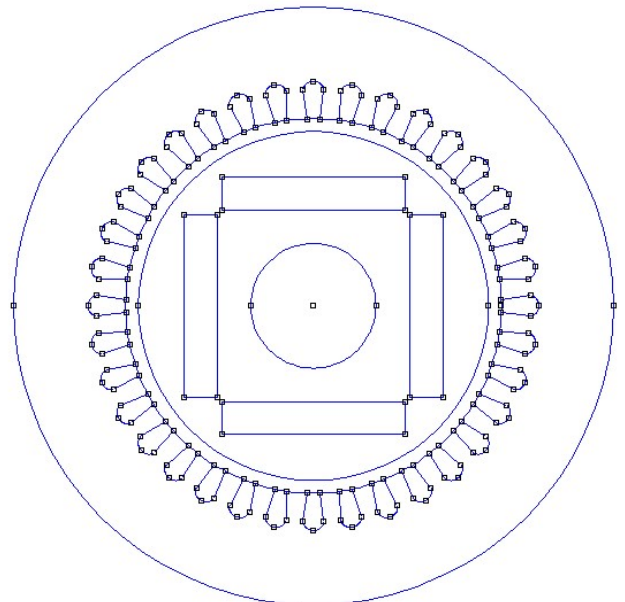
L'objectif principal de ce TP est d'étudier le comportement magnétique de la machine à aimant permanent et de tracer ses caractéristiques électromagnétiques.

B. Analyse par éléments finis d'une machine à aimant permanent

Manipulation : Les caractéristiques géométriques sont données ci-dessous, il faut suivre les opérations :

- Définition de la géométrie.
- Affectation de matériaux pour chaque région du problème.
- Définition du problème (problème « Planar » en magnétostatique).
- Définition des conditions aux limites.
- Le maillage de la géométrie de la machine en éléments finis.
- La résolution du problème.

| | | |
|------------------------------|-----------------|-----|
| Diamètre extérieur du stator | D_{exts} (mm) | 144 |
| Diamètre intérieur du stator | D_{ints} (mm) | 90 |
| Diamètre extérieur du rotor | D_{extr} (mm) | 84 |
| Diamètre de l'arbre | D_{arb} (mm) | 30 |
| Longueur de fer | L (mm) | 150 |
| Entrefer | e (mm) | 03 |
| Longueur de l'aimant | b_m (mm) | 44 |
| Largueur de l'aimant | h_m (mm) | 08 |
| Hauteur de la dent | h_d (mm) | 09 |
| Largueur de la dent | b_d (mm) | 07 |
| Hauteur de l'encoche | h_c (mm) | 09 |
| Largueur de l'encoche | b_c (mm) | 03 |
| Nombre d'encoches du stator | Z_1 | 36 |
| Courant d'alimentation | I (A) | 06 |
| Nombre de phase | m | 03 |



C. Travail demandé

1. Tracer les lignes de flux magnétique.
2. Calculer le flux magnétique dans les différentes parties du circuit magnétique.
3. Tracer la variation de l'induction magnétique dans l'entrefer (montrer les 04 pôles de la machine).
4. Calculer l'induction magnétique dans l'entrefer.
5. Tracer la variation de la densité du flux magnétique en fonction de θ (θ : angle de rotation du rotor $0^\circ-90^\circ$).
6. Tracer le couple en fonction de θ .
7. Conclusion générale.