

# Infrastructure Ferroviaire : Signalisation - Electrotechnique

## TP : Simulation de Circuits Magnétiques

Ce TP a pour but de vous faire manipuler les notions vues dans le cours sur le magnétisme et de les illustrer par l'utilisation d'un programme de calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis (ou *Finite Element Methods* en anglais).

### 1 Introduction au logiciel FEMM

Le Logiciel que vous allez utiliser, FEMM, est donc un logiciel basé sur une méthode numérique. A l'inverse des raisonnements que vous avez menés en TD - en manipulant des équations reliant le champ  $H$ ,  $B$  ou le flux  $\Phi$  sans pour autant leur donner de valeurs numériques - ce logiciel se base sur les équations générales de l'électromagnétisme pour calculer la valeur des champs en tout point de l'espace. Il permet de visualiser le comportement d'un circuit magnétique par exemple et d'en évaluer les propriétés électriques avec une précision importante.

La méthode des éléments finis est une méthode mathématique complexe, dont nous n'aborderons pas les détails. Cependant pour l'utilisateur, elle implique de respecter plusieurs étapes pour simuler le circuit magnétique désiré :

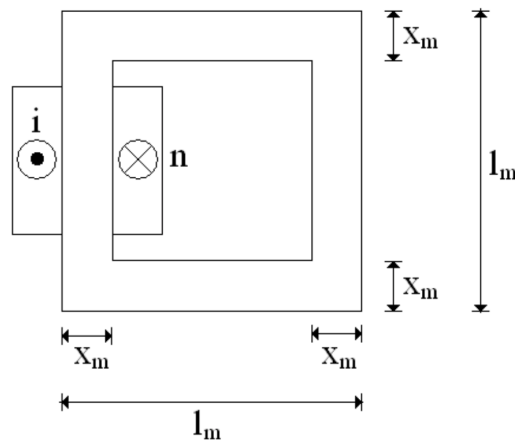
- la définition d'une géométrie : L'objet simulé doit être spécifié de manière géométrique. Plusieurs options sont possibles et la plupart des logiciels basés sur la FEM permettent d'étudier des objets en 1, 2 ou 3 dimensions. Pour des géométries complexes il est possible d'utiliser des logiciels de dessin numérique. Le système simulé sur ce TP étant simple, vous rentrerez vous-même la géométrie.
- l'attribution des matériaux : Une fois la géométrie correcte, les sous-parties de cette géométrie doivent être reliées à des matériaux qui contiennent les propriétés nécessaires à la simulation.
- le maillage de la géométrie : Au cours de cette opération, la géométrie est divisée en une multitude d'éléments, le plus souvent des tétraèdres. L'algorithme utilisé pour la méthode des éléments finis va résoudre les équations physiques, élément par élément. Plus le nombre d'éléments est grand (on parle de maillage fin), plus la solution trouvée par le logiciel sera proche de la réalité, mais le calcul sera d'autant plus long.
- la spécification des conditions aux limites : A certains endroits de la géométrie, il est nécessaire d'utiliser des conditions particulières : dans le cadre de la simulation d'un Circuit Magnétique par exemple, la géométrie reçoit un courant électrique dans les enroulements en cuivre, l'utilisateur peut souhaiter fixer le potentiel d'un objet à la masse... ces conditions d'utilisation de la géométrie du point de vue de l'utilisateur sont pour l'algorithme des conditions aux limites (de la géométrie) du point de vue mathématique.
- la résolution : C'est là tout l'intérêt de ce type de logiciel, une fois tout spécifié, vous n'avez plus qu'à cliquer sur un bouton pour que l'ordinateur fasse les calculs à votre place. Bien qu'un ordinateur soit fort en calcul, il est cependant moins bon que vous en physique (oui, même si vous avez oublié de réviser !) : si vous avez mal réalisé l'une des étapes précédentes, le calcul sera sûrement juste mais il n'aura aucun sens !

- le post-processing : Une fois le calcul réalisé, vous devez encore les afficher, voire rajouter quelques calculs pour pouvoir visualiser ou obtenir les grandeurs ou caractéristiques qui vous intéressent.

Ces étapes vous sembleront plus naturelles une fois le logiciel ouvert et surtout une fois le problème posé.

## 2 Dispositif étudié et analyse théorique

On simulera le circuit magnétique suivant :



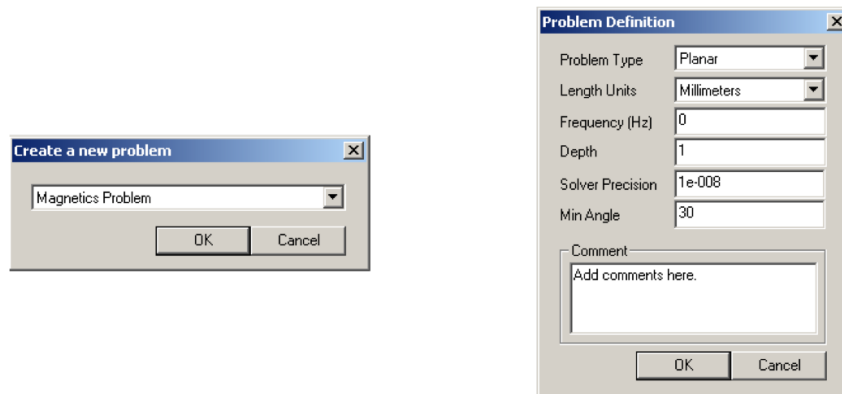
les paramètres physiques sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètre (unité)	Valeur
$x_m$ (mm)	20
$l_m$ (mm)	180
$x_b$ (mm)	10
$l_b$ (mm)	60
$n$ nombre de spires	150
$L_a$ épaisseur de la tôle (mm)	10

1. Donner l'expression de l'excitation magnétique  $H$ , de l'induction magnétique  $B$  et du flux  $\Phi$  si l'on suppose le matériau magnétique linéaire de perméabilité relative  $\mu_r$ . On prendra avec  $i = 0,75A$ . Calculer l'induction magnétique  $B$  pour une perméabilité relative  $\mu_r 10^4$ .
2. Donner l'expression de l'inductance  $L$  du circuit magnétique et faire l'application numérique.

### 3 Description du circuit sous FEMM

Ouvrir FEMM4.0 (accessible dans le menu 'Démarrer'). Créer un nouveau fichier (*file, new*). Choisir un problème de type magnétique. La fenêtre obtenue (Figure ci-dessous) va permettre de lancer les démarches décrites au début du TP.









Dans un premier temps nous allons définir le type de problème : FEMM peut traiter des problèmes statiques (fréquence nulle) ou harmoniques (mais pas temporels). Nous allons dans ce TP travailler en statique. Modifier les paramètres pour avoir des unités en millimètres et indiquer la profondeur adéquate (menu *problem*).

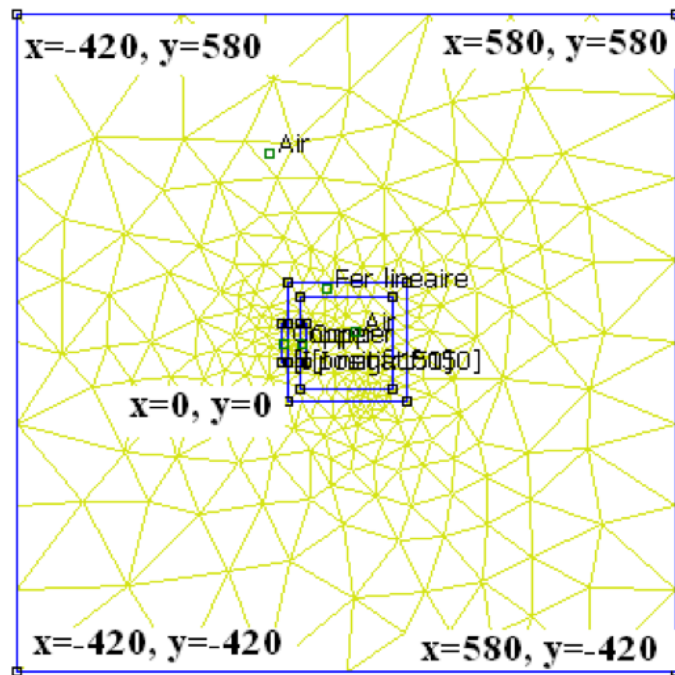
Régler ensuite les paramètres de la grille afin que les points créés soient sur la grille (menu *grid*). Montrer la grille (*grid* → *show grid*), attacher les points à la grille (*grid* → *snap to grid*) et régler la grille (*grid* → *set grid*) pour que l'espace entre deux points soit de 10mm.

Commencer le dessin de la bobine. On utilisera la barre d'outils de commandes FEMM :



On utilisera l'outil point  pour placer les différents points de la bobine suivi de l'outil ligne droite  pour relier les points entre eux. On pensera à utiliser les commandes de zoom     et les indications de coordonnées (en bas à droite de la fenêtre graphique) pour plus de commodité. **Pour rentrer directement les coordonnées des points, utiliser la touche <TAB>.**

Etablir également un domaine extérieur, nécessaire pour effectuer le calcul du potentiel vecteur par FEMM. On prendra un domaine carré de côté 1m. Vous devriez obtenir un résultat ressemblant à la figure ci-dessous :

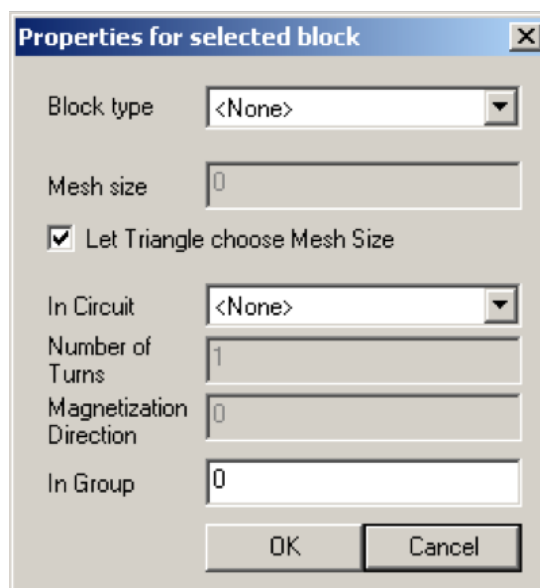


On peut alors passer à l'attribution des matériaux avec l'outil .

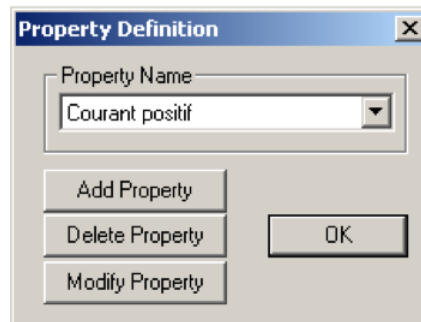
On définit dans un premier temps les quatre matériaux dont nous avons besoin : l'air, les bobinages, le fer linéaire et le fer saturable. Pour cela, on peut soit les créer (menu *Property* → *Materials* → *Add Property*) soit ajouter des matériaux prédéfinis (menu *Property* → *Material Library*).

Créer un matériau Fer10000 (respectivement Fer1000 et Fer100) de perméabilité relative isotrope ( $\mu_x = \mu_y$ ) et égale à  $10^4$  (respectivement  $10^3$  et  $10^2$ ). Utiliser les matériaux prédéfinis *Air*, *Pure Iron* et *Copper*. Indiquer leurs caractéristiques.

Attribuer les matériaux aux surfaces correspondantes. Pour cela, sélectionner le matériau avec un clic droit et l'ouvrir (menu *Operation* → *Open Selected* → *Bloc Type*). Vous devriez obtenir la fenêtre suivante :

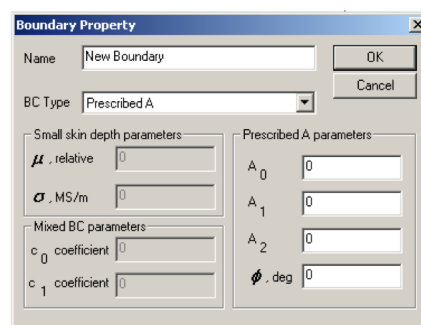





Il reste à définir les sources avant de réaliser le maillage. Pour cela aller dans le menu *Propriétés* → *Circuit*. Vous devriez obtenir la fenêtre suivante :



Définir deux circuits Courant positif (0,75 A) et courant négatif (- 0,75 A) et les affecter aux matériaux concernés (menu *Operation* → *Open Selected* → *In Circuit*). Ne pas oublier de définir le nombre de spires.



Appliquer des conditions de Dirichlet au contour extérieur (menu *Propriétés* → *Boundary* → *Add Properties*). Cette condition imposera des conditions de flux parallèle au contour. Créer cette condition aux limites en choisissant une BC (*Boundary Condition*) *Type Prescribed A* avec tous les paramètres nuls comme illustré ci dessous. Sélectionner les lignes du contour extérieur (avec l'outil *ligne*) puis appliquer les conditions de Dirichlet (menu *Operation* → *Open Selected*).








Appliquer le maillage avec le bouton . On peut alors lancer le calcul en cliquant sur  puis voir visualiser les résultats du postprocessing en cliquant sur .

## 4 Simulation et exploitation des résultats

- Réaliser les simulations pour les différentes valeurs de perméabilité du matériau magnétique.

Vous visualiserez les lignes de champ grâce au bouton  et la cartographie des champs grâce au bouton . Que peut-on dire de la répartition des champs dans les différents matériaux ?

- Tracer l'induction magnétique. On tracera dans un premier temps une ligne sur laquelle on souhaite l'induction à l'aide des commandes    puis on procédera dans un second temps au tracé  . Commentez les résultats ; les hypothèses que nous avons prises dans le cours :

- le champ  $B$  est contenu dans le matériau magnétique
- les spires sont négligeables devant le matériau magnétique

sont-elles valables ? (ou dans quelle mesure sont elles valables)

5. Calculer l'inductance propre du circuit. On peut montrer que cette inductance se calcule par la formule suivante :

$$L = \frac{1}{i^2} \iiint_{\text{Volume Cuivre}} \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} \cdot dV$$

Le résultat de cette intégrale triple est calculé par FEMM : Il faut sélectionner les surfaces de cuivres du domaine d'intégration à l'aide de l'outil surface puis effectuer le calcul avec l'outil intégral. Comparer les résultats avec les prédéterminations théoriques.

6. Modifier le matériau linéaire par un matériau saturé. Observer les zones de saturation. Calculer l'inductance obtenue et commenter.
7. A partir d'un matériau linéaire, rajouter un entrefer d'épaisseur  $e = 1\text{mm}$  pour  $\mu_r = 10^4$ .
- Calculer la nouvelle valeur de l'inductance réalisée.
  - Simuler le circuit magnétique et à l'aide de FEMM, calculer la valeur d'inductance réalisée.
  - Lorsque nous faisons le calcul théorique nous supposons que le champ  $H$  dans l'entrefer est contenu dans la même section que celle du noyau magnétique. Cette hypothèse est-elle vraie ?