

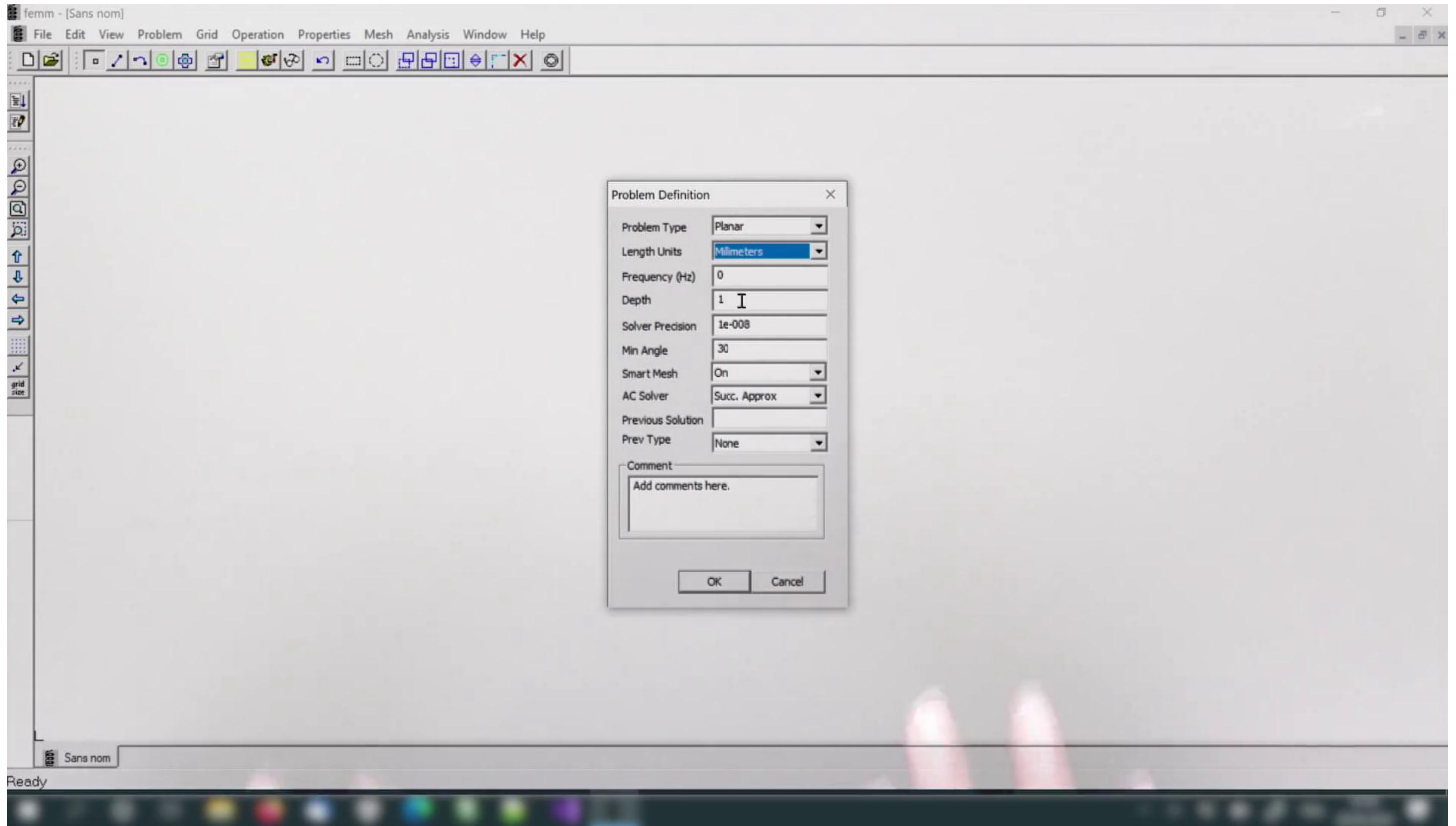
Bonjour. Le but de cette présentation, c'est de vous montrer une méthode numérique pour calculer les caractéristiques magnétiques d'un système électromécanique. Cette méthode, c'est celle des éléments finis qui consiste à discrétiser la géométrie du système et à résoudre les équations de Maxwell en chacun des points de discrétisation. Plutôt que de vous expliquer comment fonctionne ce genre de logiciel, je vous propose d'en utiliser un par vous-même. Ce logiciel, c'est FEMM, F-E-M-M que vous pouvez télécharger gratuitement sur internet et même améliorer, si vous en avez envie. Ce logiciel que vous pouvez installer sur votre ordinateur, qui ne fonctionne malheureusement que sur Windows, mais qu'on peut utiliser avec un émulateur sur Linux et aussi sur Mac, qui s'appelle Wine. Tous les détails sont sur le site du logiciel d'ailleurs. Ce logiciel, je l'ai démarré ici. Et lorsqu'on veut créer un nouveau problème, on vous demande si vous voulez créer un problème magnétique. Vous pouvez aussi résoudre des problèmes électrostatiques ou de flux de chaleur. Nous, on va créer un problème électromagnétique.

Notes

Summary



0m 04s



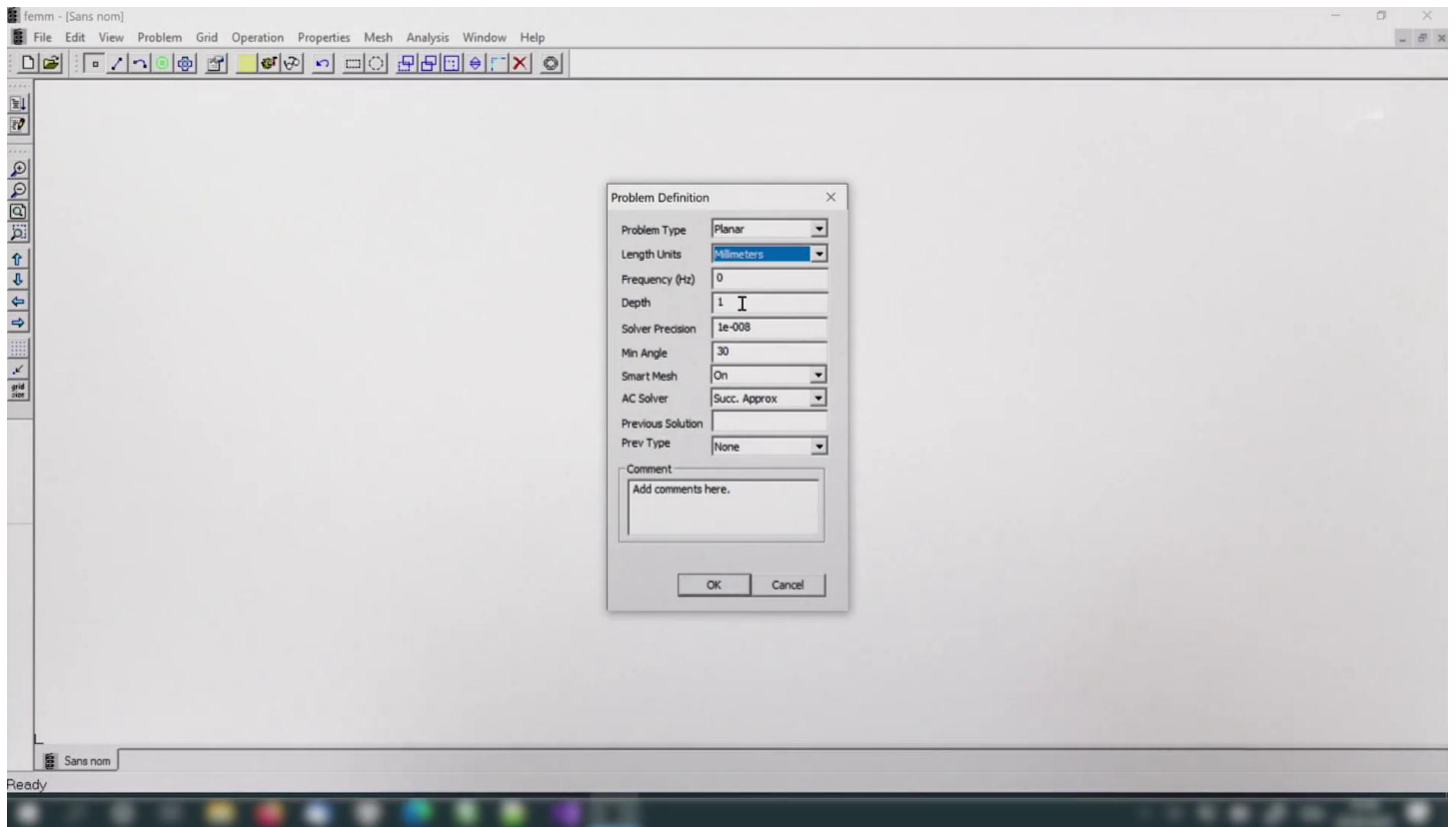
Et puis, on se retrouve dans un environnement qui est relativement classique avec un certain nombre d'outils qu'on peut utiliser pour définir la géométrie et les propriétés physiques de notre système. La première chose qu'on doit faire quand on crée un nouveau problème, c'est de définir un certain nombre de constantes. D'abord, on va essayer de fonctionner en millimètres, parce qu'en pouce, c'est un petit peu plus compliqué pour nous, en tout cas pour moi, de donner des dimensions. On peut avoir des problèmes qui ont une fréquence, ici, qui est différente de zéro donc on peut faire des problèmes en magnétostatique ou bien ce qu'on appelle en magnétodynamique, donc à fréquence fixe. Ça veut dire que tous les circuits de votre problème auront la même fréquence avec ce logiciel. Il existe des logiciels qui vous permettent de faire des calculs en régime transitoire, mais ce n'est pas le cas directement avec FEMM. C'est possible, mais ce n'est pas directement implémenté dans le logiciel lui-même. Il y a un autre paramètre qui est important de définir, c'est la profondeur. FEMM est un logiciel en deux dimensions, on va définir la géométrie en deux dimensions.

Notes

Summary



1m 31s



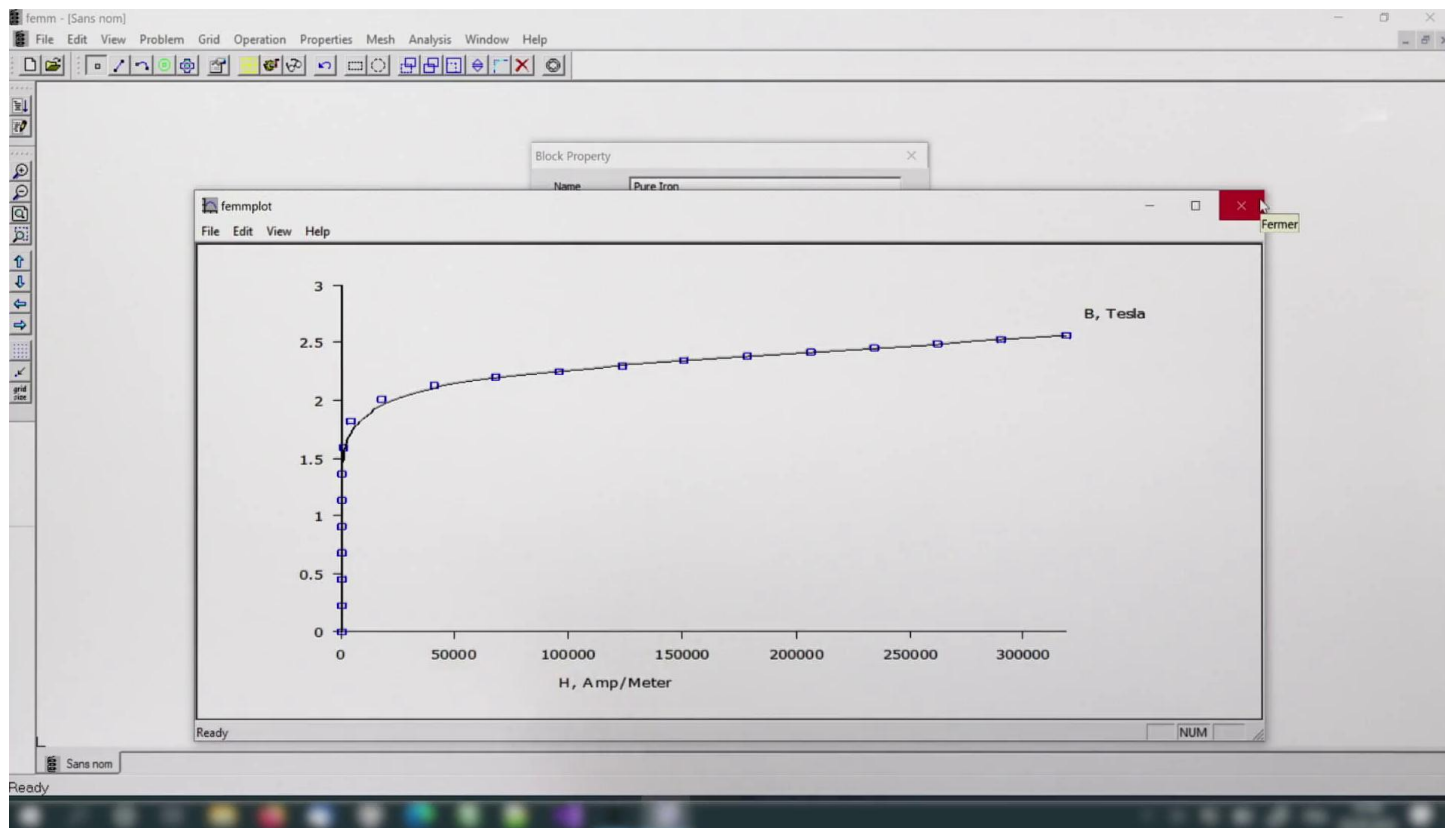
Le souci qu'il y a, c'est que le logiciel assume que la géométrie est infiniment longue, mais va faire des calculs sur une profondeur donnée. On néglige les effets d'extrémité, mais on fait quand même les calculs sur une certaine profondeur, qu'il faut, bien sûr, donner.

Notes

Summary



3m 08s

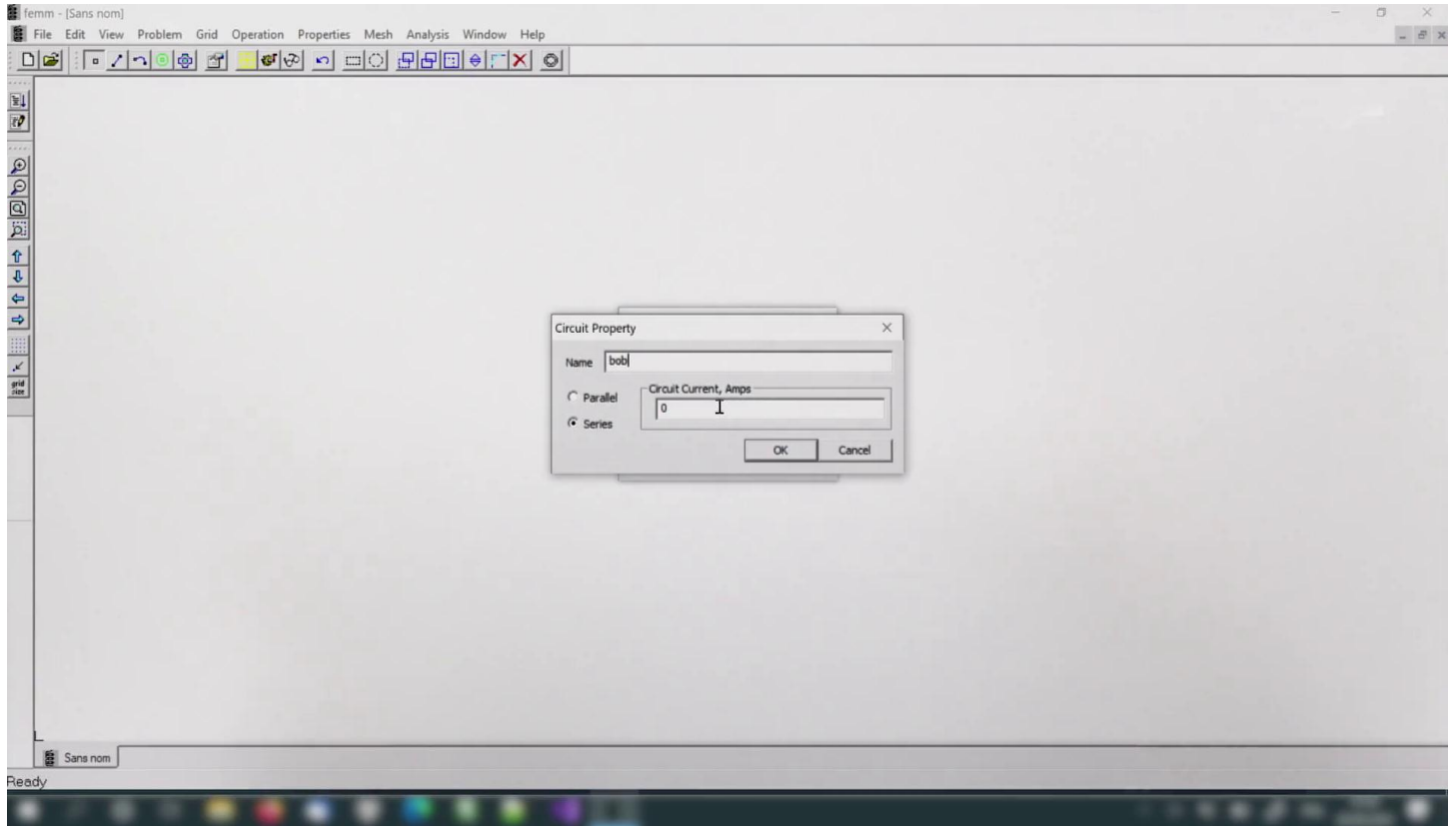


Le reste des paramètres, je vous laisse consulter le mode d'emploi pour leur signification. Une fois qu'on a fait ça, on a défini le cadre du problème et on peut commencer à en définir les propriétés. Les propriétés, elles sont de divers types. D'abord, on va définir les matériaux qu'on va utiliser. On va définir les conditions aux limites du système. Et puis, on va définir des circuits. Pour les matériaux, le plus simple, c'est d'utiliser les matériaux qui sont déjà dans le logiciel, dans la librairie des matériaux. Et puis typiquement, vous pouvez choisir un matériau comme, par exemple, l'air, et le mettre dans votre modèle. On peut prendre aussi un peu de fer ou un aimant, etc. Une fois que vous avez défini votre matériau dans votre modèle, vous pouvez même le modifier, donc vous double-cliquez dessus. Typiquement pour le faire, on se rend compte qu'on a une caractéristique non linéaire dont on peut éditer les propriétés. On peut spécifier un certain nombre de points et puis, on a la possibilité de visualiser la courbe B-H, donc entre induction en Tesla et le champ en ampère par mètre. La courbe B-H, vous pouvez la spécifier en fonction du matériau qui vous intéresse.

Notes

Summary





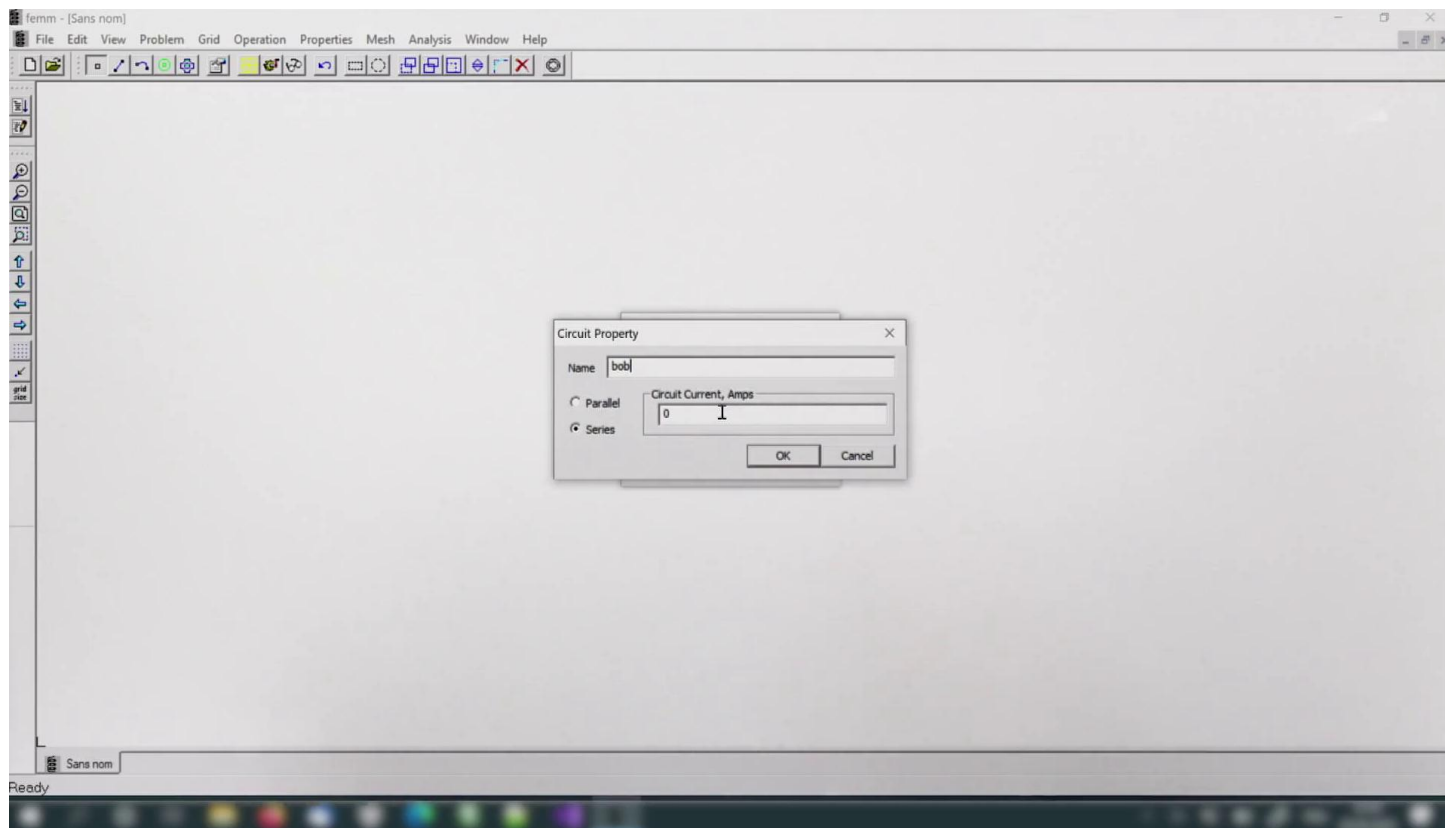
Il y a d'autres propriétés dans le matériau, typiquement, des questions d'épaisseur des tôles pour faire des calculs du courant de Foucault et une espèce de modélisation de l'hystérésis. Je ne rentre pas dans les détails. Une fois que vous avez spécifié votre matériau, que vous l'avez importé, il est disponible dans votre problème. Ça, c'est pour les matériaux. Ça, c'est bon. Ensuite, dans les autres propriétés, il y a les conditions limites, on verra plus tard ce que ça implique. Dans les systèmes symétriques, on peut définir des axes de symétrie. Les conditions sur les points, je l'utilise jamais. Et puis, il y a les conditions sur les circuits. Typiquement, on peut ajouter des propriétés de circuit. Si vous avez une bobine, vous allez avoir la possibilité de définir quel est le courant qui passe dans cette bobine. Si vous êtes en magnétostatique, vous allez spécifier une valeur réelle à cet endroit. Si vous êtes avec une fréquence qui est non nulle, vous pouvez définir une valeur complexe, parce que quand on a un système avec des fréquences non nulles, on travaille en complexe. On remplace la variable réelle ou toutes les variables réelles par des variables complexes, ce qui nous permet de gérer les sinus.

Notes

Summary



5m 09s



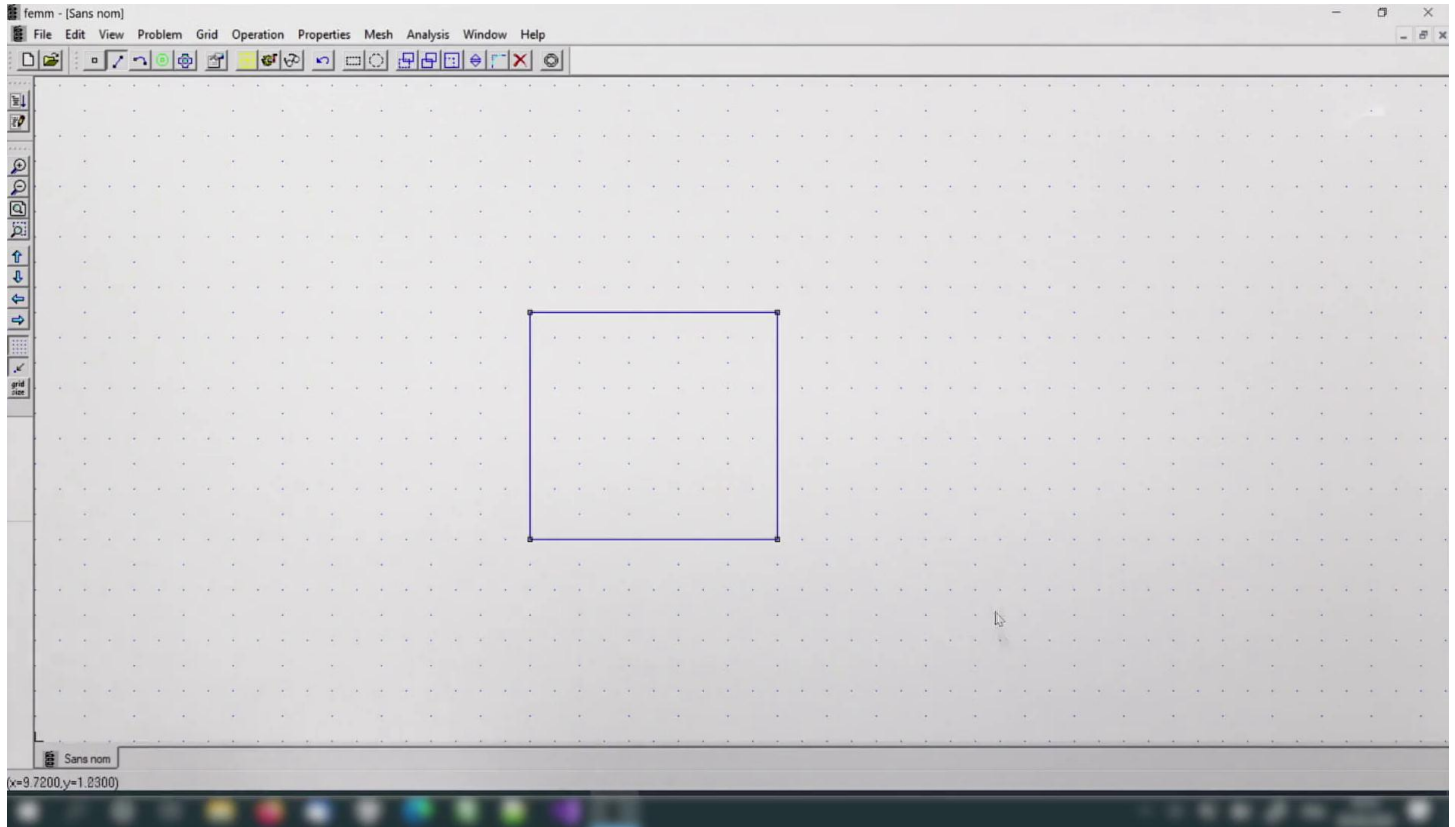
C'est bien pratique ces [inaudible 00:06:40] complexes, même dans les évènements finis. Et puis, si vous affectez plusieurs régions du système au circuit, vous voulez savoir si ces régions sont en série ou en parallèle, on reviendra là-dessus plus tard.

Notes

Summary



6m 38s

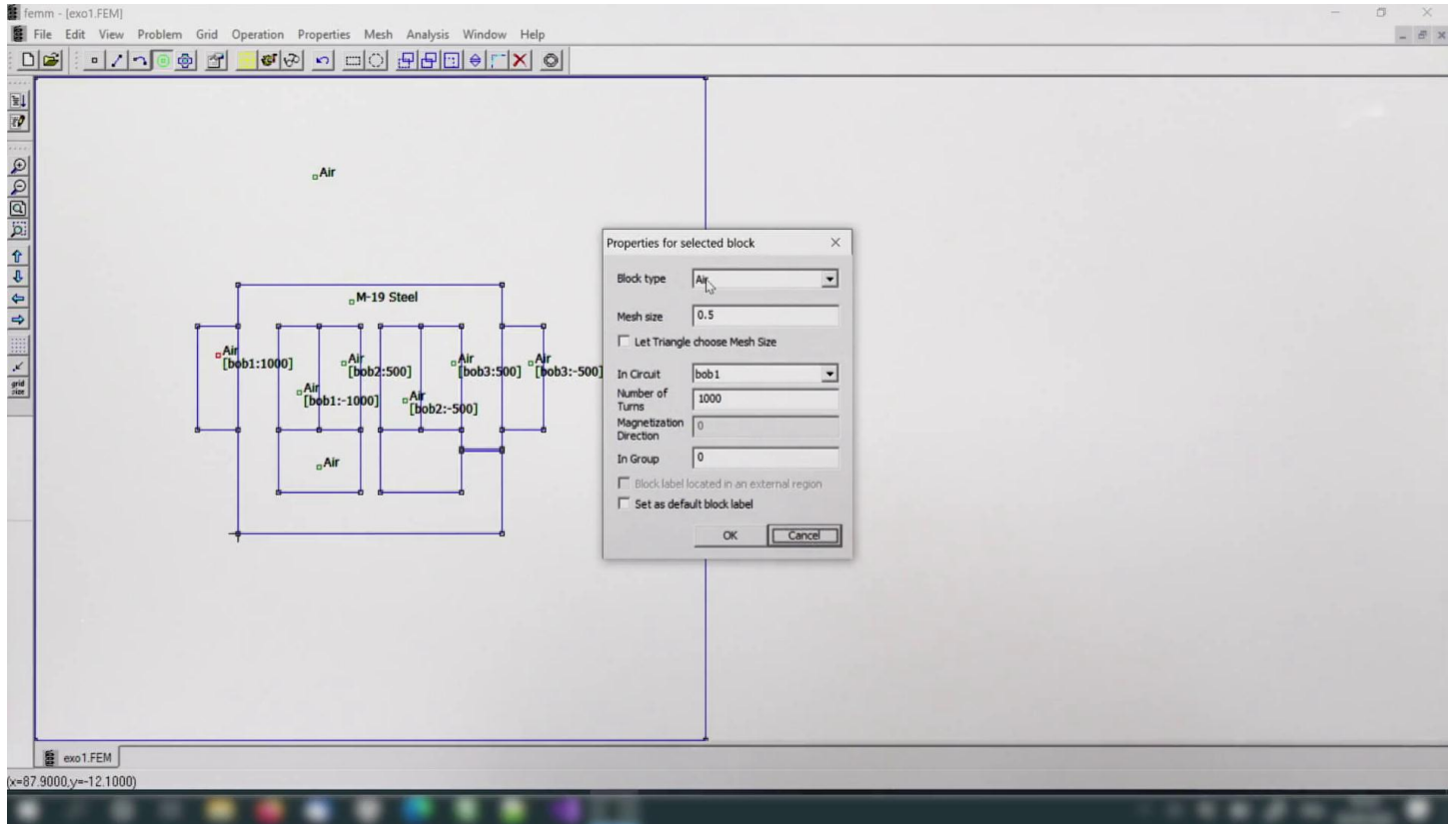


Voilà, on peut créer ça. Une fois qu'on a fait les circuits, on va créer des points. Pour créer des points, vous avez la possibilité de définir une grille, de la visualiser, de faire une taille des grilles. Ça, je peux faire, comme ça, ça aura à peu près de l'allure. Ensuite, vous vous mettez en mode points. Il y a plusieurs modes : le mode points, lignes, arc de cercles, matériaux et groupes. Le mode points, c'est le premier outil, nous permet de définir des points. Donc, on peut cliquer dessus, et puis, je peux dessiner une géométrie avec des points. Si j'ai envie, je peux également utiliser le Tab, ça vous met un petit menu, qui vous permet d'entrer des coordonnées de votre point. C'est parfois plus facile pour pouvoir avoir un point précis que de se baser sur la grille. Par défaut, il prend la position de la souris. Ce point ne m'intéresse pas, je vais l'éliminer. Donc je vais cliquer avec le bouton droit de la souris. Et puis, ensuite, j'ai une petite icône pour l'éliminer. Donc j'ai dessiné mes points. Je peux dessiner des lignes. Pour faire une ligne, je relis deux points. Après, je peux affecter un matériau, donc je clique sur cette icône, je mets le matériau dedans.

Notes

Summary





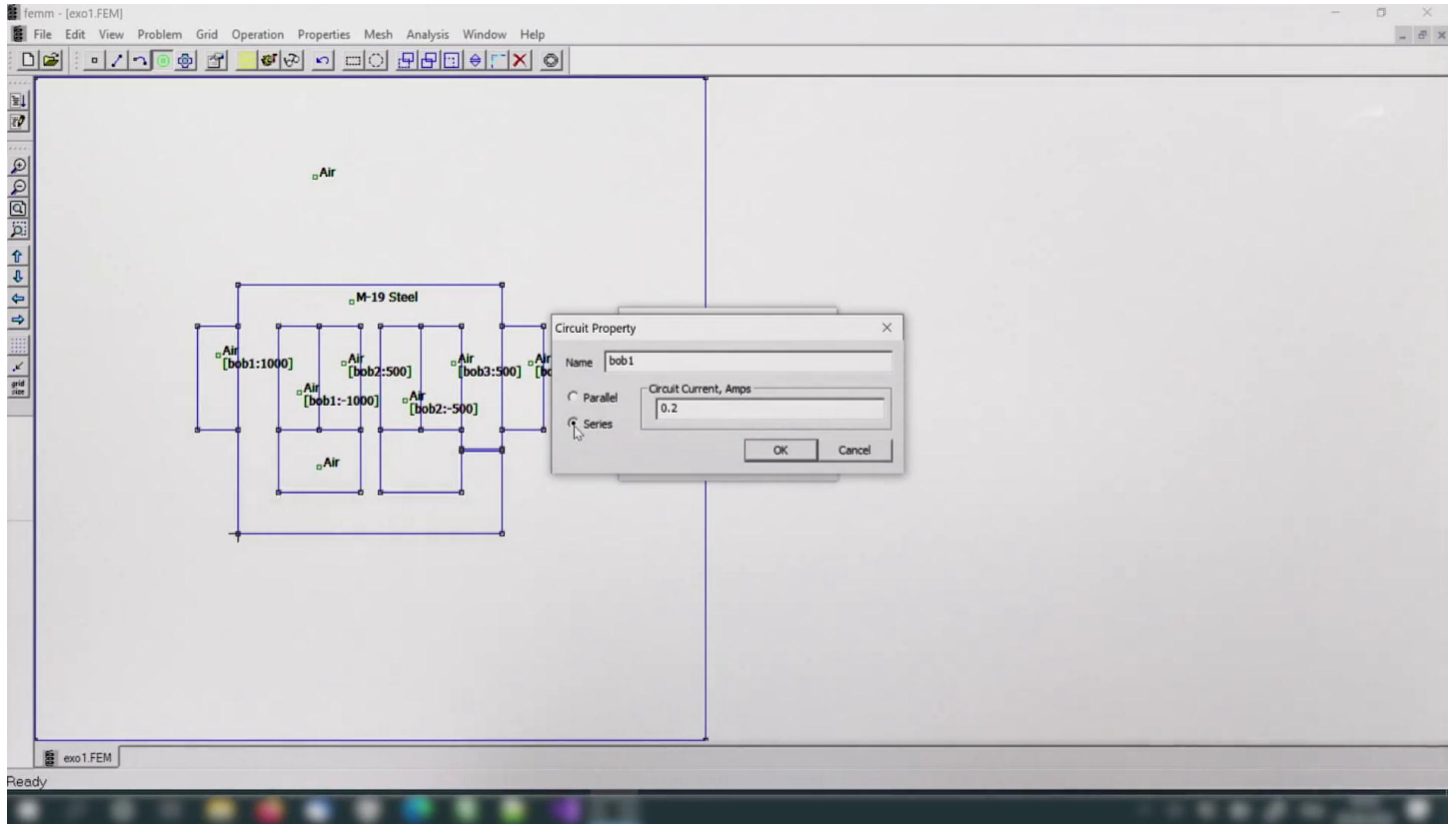
Ensuite, pour le sélectionner, je vais utiliser le bouton droit de la souris, comme pour tout le reste. Je sélectionne et puis, j'appuie sur la barre d'espace et à ce moment-là, je peux choisir les propriétés du matériau. Par exemple... À présent, j'ai créé un rectangle de fer. Je peux continuer comme ça ou bien, je peux charger la géométrie. J'ai pas le temps de dessiner le tout, je vais charger la géométrie. C'est la géométrie de l'exercice sur inductance propre et inductance mutuelle. Et puis, on voit plusieurs choses. La première chose, c'est que toute la géométrie est ici. On voit que j'ai défini un certain nombre de circuits, que j'ai appelés bob1, bob2 et bob3, parce que j'ai une bobine primaire, une bobine secondaire et puis, ma bobine, j'ai envie de dire, tertiaire de mon troisième enroulement. Ces bobines, j'ai réussi à les spécifier simplement en me mettant en mode Matériaux, en appuyant sur la barre d'espace, et puis, on voit que dans cette bobine dont j'ai affecté comme matériau, l'air. J'aurais pu mettre du cuivre, mais la seule chose qu'il y a de différent entre l'air et le cuivre, c'est la résistivité du matériau. Au niveau magnétique, il y a pas de différence.

Notes

Summary



8m 40s



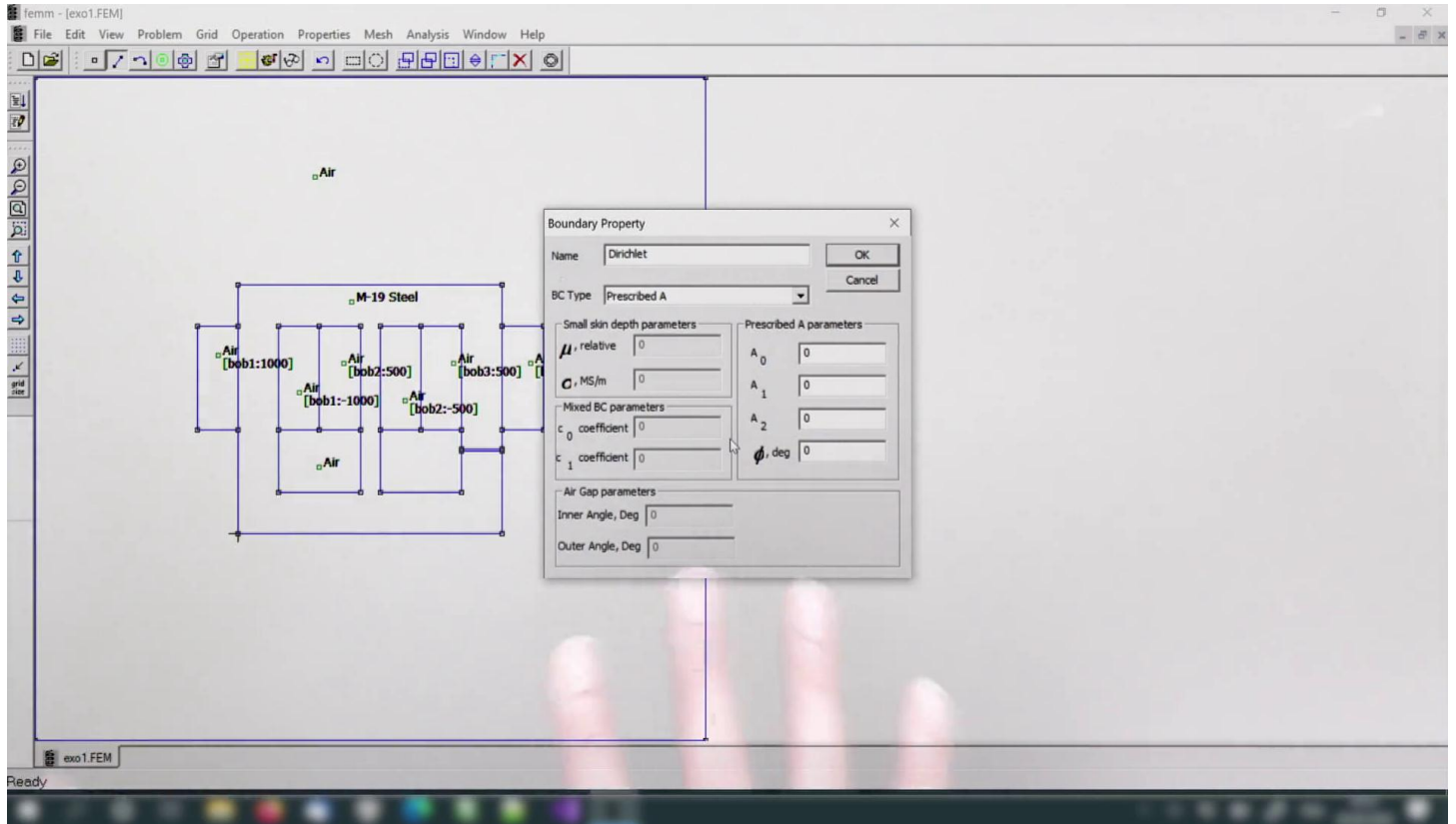
Et puis, comme je suis à fréquence fixe, ça n'a pas tellement d'intérêt d'avoir une résistivité, donc j'ai mis de l'air. C'était plus facile pour moi d'avoir qu'un seul matériau. La taille du maillage, j'y reviens tout à l'heure. Je mets comme circuit, la bobine. Et puis, je mets le nombre de tours, dans l'exercice, il y en a 1 000. Et puis voilà. C'est pas un aimant. On peut spécifier des groupes à cet endroit, si on veut avoir un groupe de plusieurs objets : des points, des lignes, des matériaux. Ça nous permet de sélectionner d'un coup un groupe et de le faire bouger. Nous, on va pas le faire maintenant. Ça, c'est OK. Juste une petite chose, cette bobine a un nombre de tours de 1 000, et puis, la région d'à côté a un nombre de tours de -1000, simplement parce qu'une fois je pénètre dans l'écran, puis l'autre fois, j'en sors, donc j'ai mis un nombre de tours qui peut être négatif pour simplement indiquer ça. Si je regarde ce que j'ai défini comme courant : bob1 Là, en courant de 0.2 ampère avec les diverses régions, donc la partie de gauche et la partie de droite qui sont en série. Je peux aussi définir deux régions différentes et puis, je peux aussi avoir un nombre de spires qui n'est pas 1 000, mais simplement avoir un courant qui est de 200 ampères, ça va aussi marcher.

Notes

Summary

10m 31s





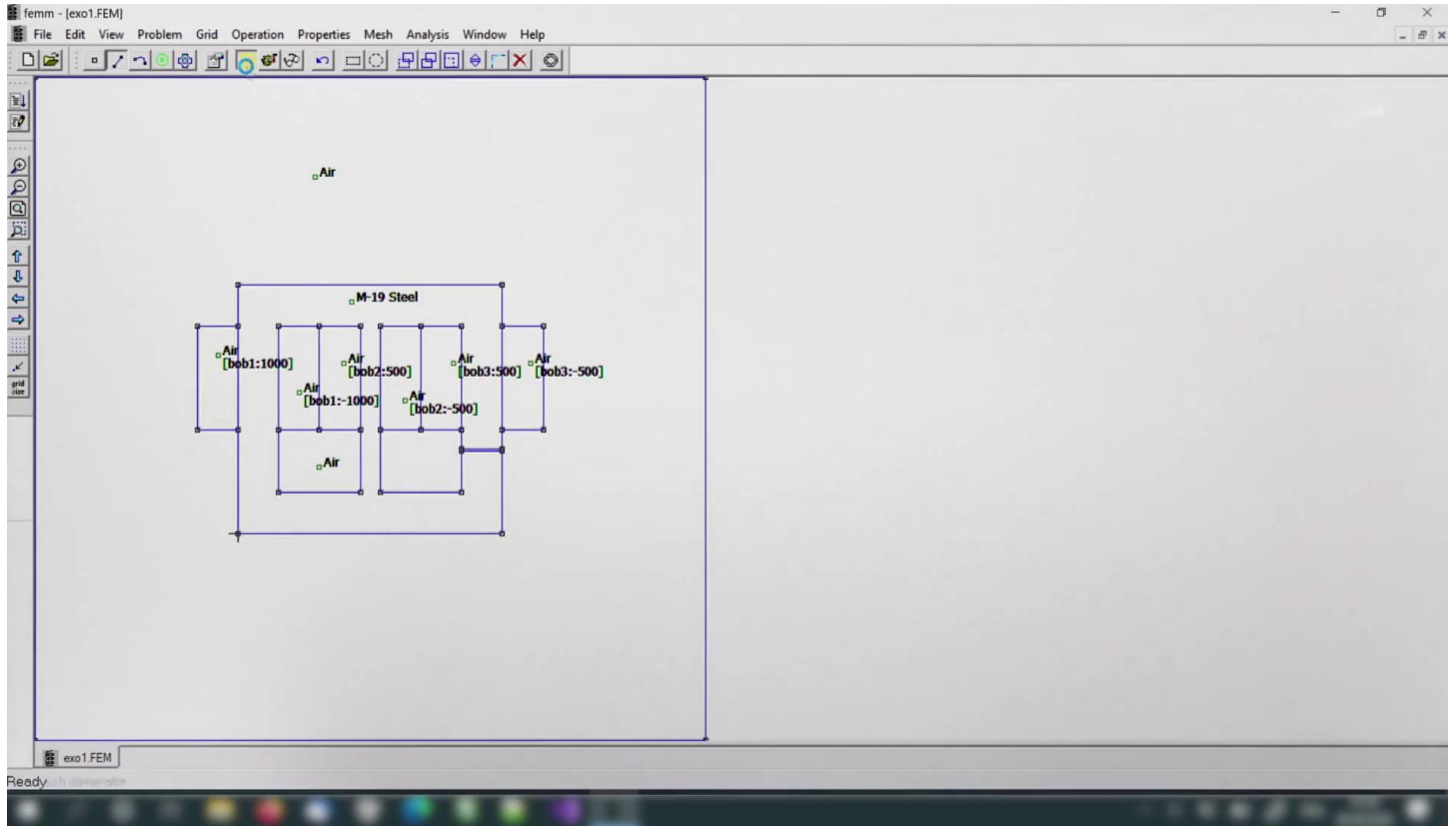
Le logiciel va répartir le courant sur toute la surface de la région concernée. Je pourrais avoir deux régions : bob1+ et bob1-. Ça marche aussi avec un courant négatif dans le cas du bob1-. OK. Il y a une autre chose qu'on doit définir à part les matériaux, c'est les conditions limites du système. Vous voyez que j'ai mis des... J'ai emballé en quelque sorte ou entouré mon transformateur, il ne bouge pas... mon transformateur d'une boîte sur laquelle je mets des conditions limites. Si je vais regarder dans les propriétés de la ligne, donc je sélectionne avec le bouton à droite, elles ont toutes les mêmes. J'en ai sélectionné une. On voit que la propriété de ce segment, c'est une condition limite qui s'appelle Dirichlet. Qu'est-ce que c'est que cette condition limite ? Je peux en sélectionner plusieurs. Je pourrais toutes les sélectionner et leur affecter une autre condition, ou pas. Qu'est-ce que c'est que cette condition limite ? C'est dans les « Boundary ». J'ai appelé cette propriété « Dirichlet ». C'est simplement une condition où on spécifie qu'il va pas y avoir de flux qui sort de ma boîte. C'est la manière la plus simple de procéder. C'est pas la manière la plus efficace.

Notes

Summary

12m 22s





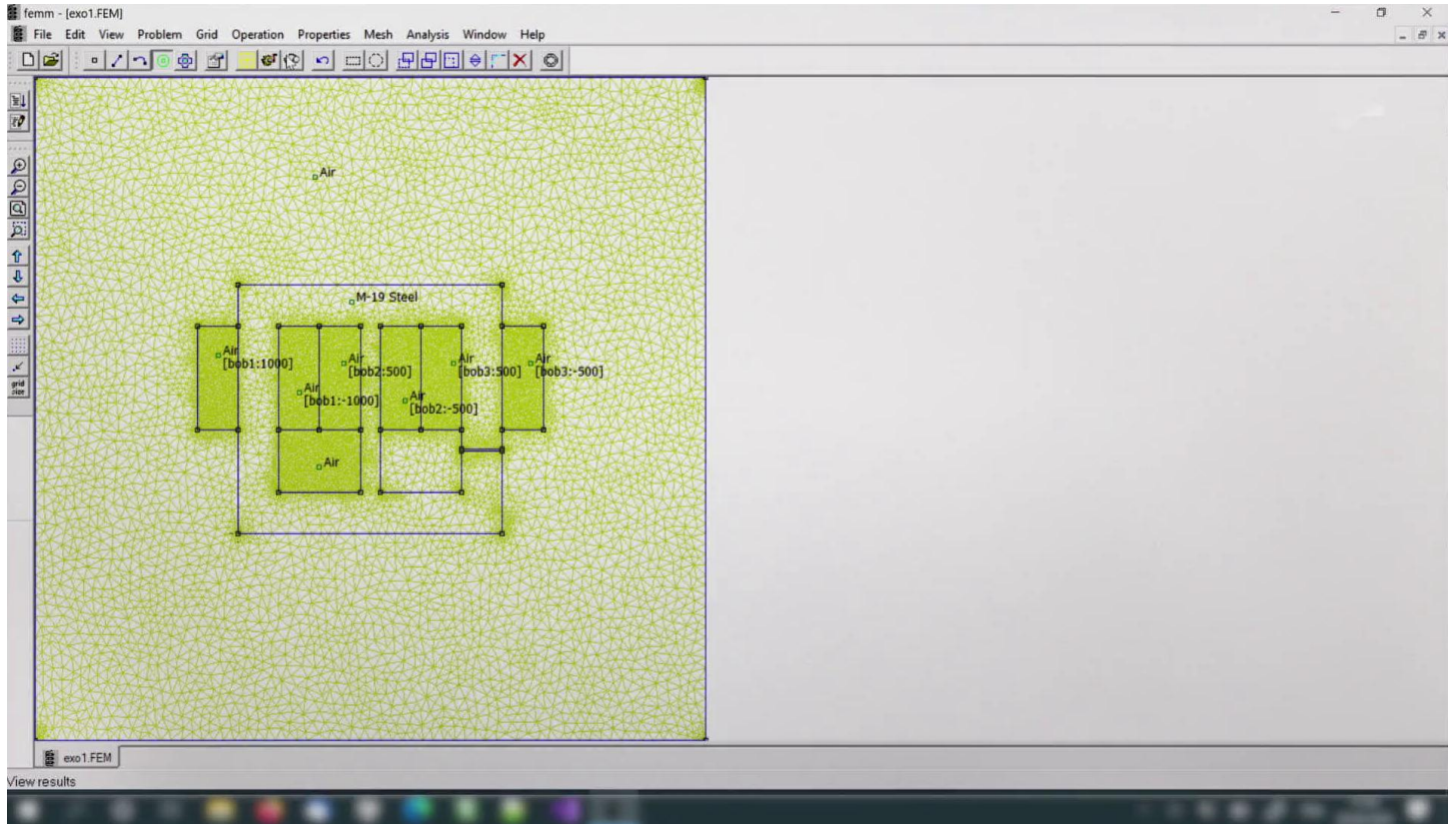
Si vous lisez le mode d'emploi, il y a une manière de définir une condition limite qui est plus efficace au niveau de la modélisation de l'infini, mais cette condition-là est relativement simple et historiquement, on n'avait pas les autres. Moi, j'ai l'habitude de mettre ces choses-là comme ça, mais lisez le mode d'emploi et vous verrez qu'on peut définir des conditions limites qui sont peut-être plus efficaces que celle-ci, parce que celle-ci nous force d'avoir une boîte qui est relativement grande dans laquelle, on va devoir calculer le flux magnétique. Ma condition de Dirichlet a tous les paramètres à zéro ici. Ça garantit qu'il n'y a pas de flux qui sort. Une fois que j'ai fait ça, j'ai affecté tous les matériaux. J'ai affecté un fer silicium à ma partie ferromagnétique. M19, c'est un fer silicium d'assez bonne qualité, laminé, saturable. Maintenant, il ne vous reste plus qu'à simuler.

Notes

Summary

14m 06s





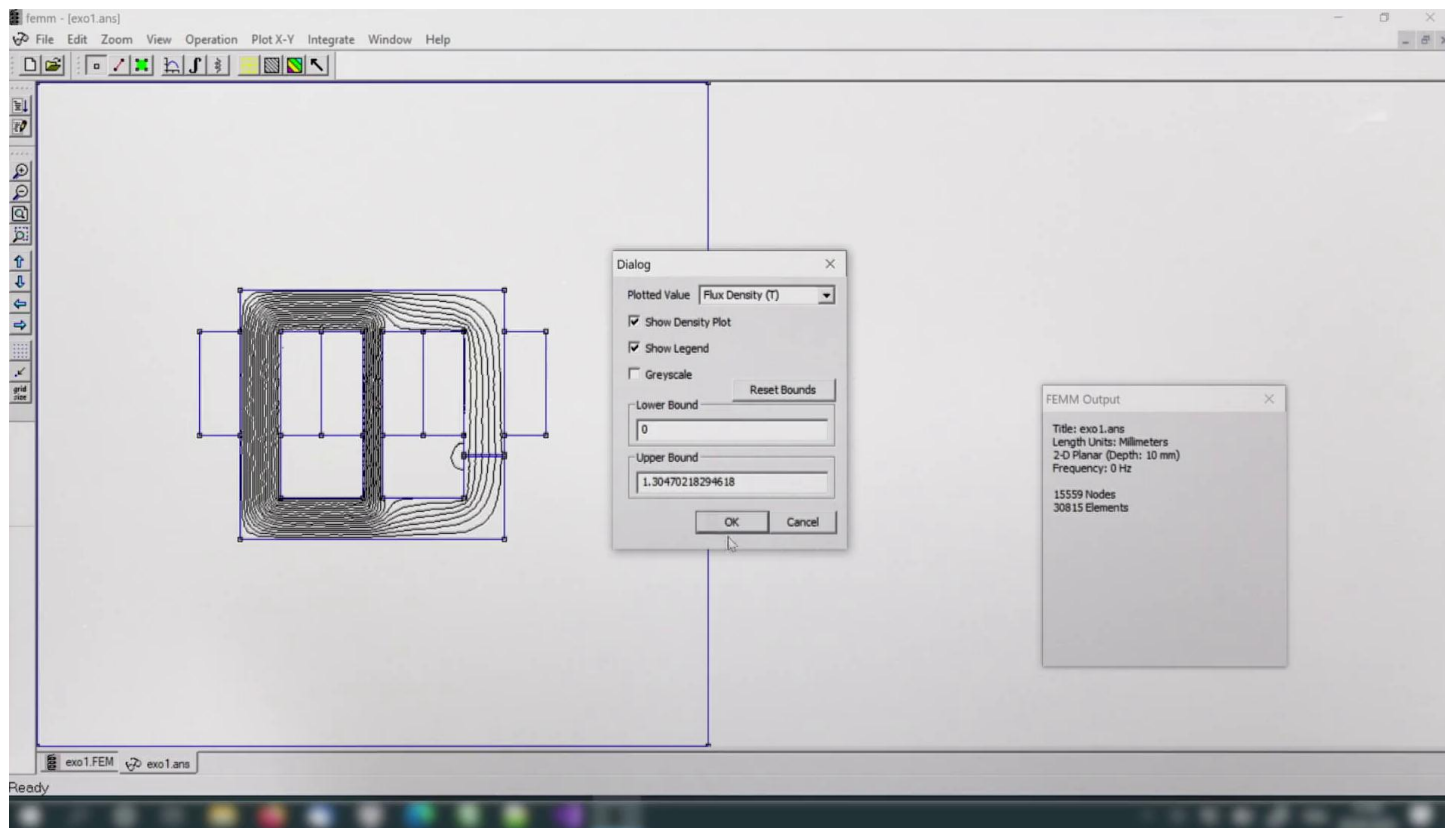
Comme je l'ai dit, pour pouvoir simuler, il faut discrétiser. Ça, le système le fait plus ou moins tout seul. Il crée ce qu'on appelle un maillage et ce maillage va être déterminé par la géométrie, et puis aussi par un certain nombre de paramètres que vous spécifiez. Moi, j'ai spécifié la taille minimale des mailles. Pour avoir de bons résultats, il faut que je me remette en mode points. Non, en mode matériaux. On peut spécifier la taille maximale de la maille, pour être sûr qu'on va avoir un maillage, donc une discrétisation qui est suffisamment fine pour avoir des calculs suffisamment précis. On peut le faire ou bien, on peut laisser l'algorithme le faire pour vous. Si je fais ça comme ça et puis, que je refais le maillage, vous verrez qu'ici, j'ai un maillage qui est beaucoup plus grossier à cet endroit. Je vais laisser comme ça. Je pense que c'est largement suffisant pour ce que j'ai envie de faire aujourd'hui. Ça, c'est le maillage, donc le logiciel va calculer les équations de Maxwell dans tous les sommets de ces petits triangles. C'est ce qu'il fait maintenant. Vous voyez qu'il calcule. Comme on a un système saturable, on a une méthode qui est non linéaire pour faire les calculs, par approximation. Et puis ensuite, on va regarder quels sont les résultats.

Notes

Summary

15m 29s





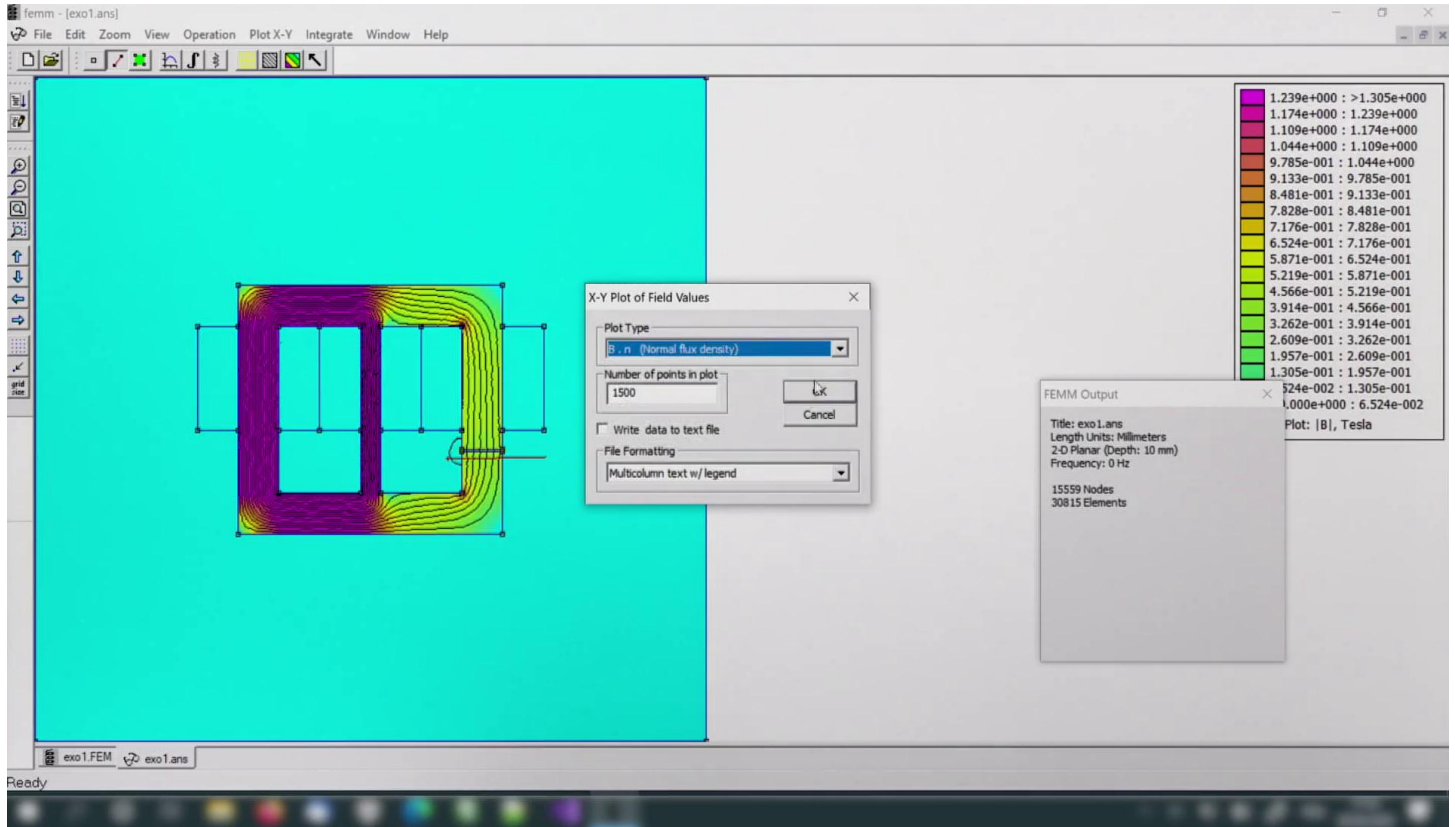
Les résultats, on peut afficher diverses choses. D'abord, on peut voir les lignes de champ. C'est sympa, ça veut dire qu'en gros, on voit par où passe le flux dans notre système. Ensuite, on peut voir quelles sont les valeurs des inductions dans le système sous forme de dégradé.

Notes

Summary

17m 16s





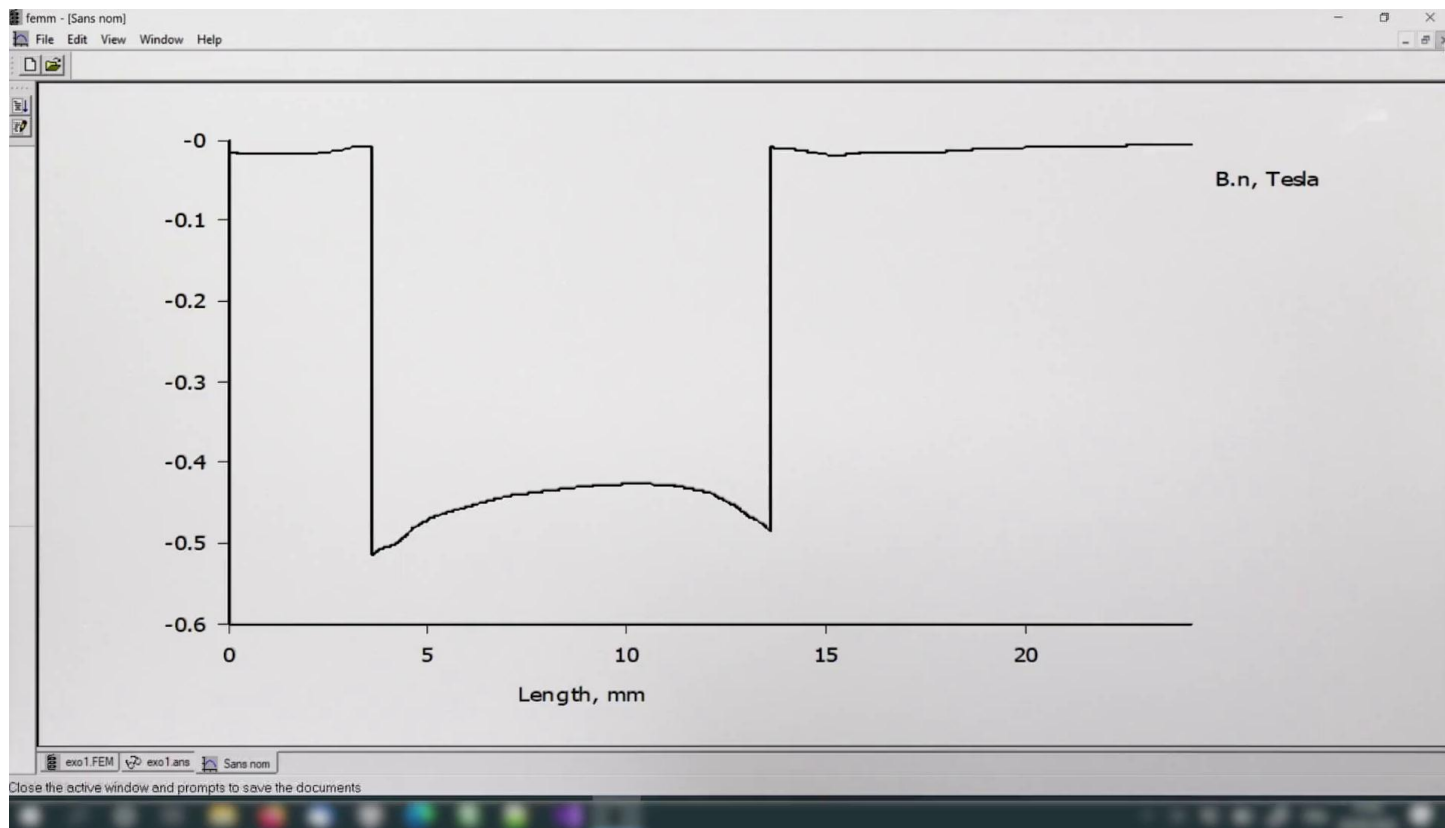
Typiquement, ici, vous avez les inductions dans le système et on voit, par exemple, que dans les coins à ces endroits ici, vous avez un peu de saturation. On voit aussi que vu qu'il y a un petit entrefer, on a beaucoup plus de flux qui passe par là, ce à quoi on s'attendait, que par là. J'ai oublié de préciser que je n'ai mis du courant que dans la première bobine, j'en ai pas mis dans les deux autres. Donc ça, c'est pour les lignes de champ et pour l'induction. On peut faire des calculs. On peut faire des calculs et des courbes, donc des calculs sur des lignes. Typiquement, je peux regarder quel est le flux qui va circuler entre ces deux points. Je peux le visualiser, donc je peux visualiser l'induction normale à cet endroit. Elle est assez constante. Entre 1,322 et 1,322, donc il y a peu de variation. Ce plot-là n'est pas très intéressant à visualiser. Là, j'ai choisi deux points qui étaient existants. Je peux aussi en cliquant avec le bouton de droite, mettre mes points n'importe où. Il faut déjà que j'élimine les autres. Avec Escape. Typiquement, je pourrais regarder ce qui se passe ici.

Notes

Summary

17m 43s





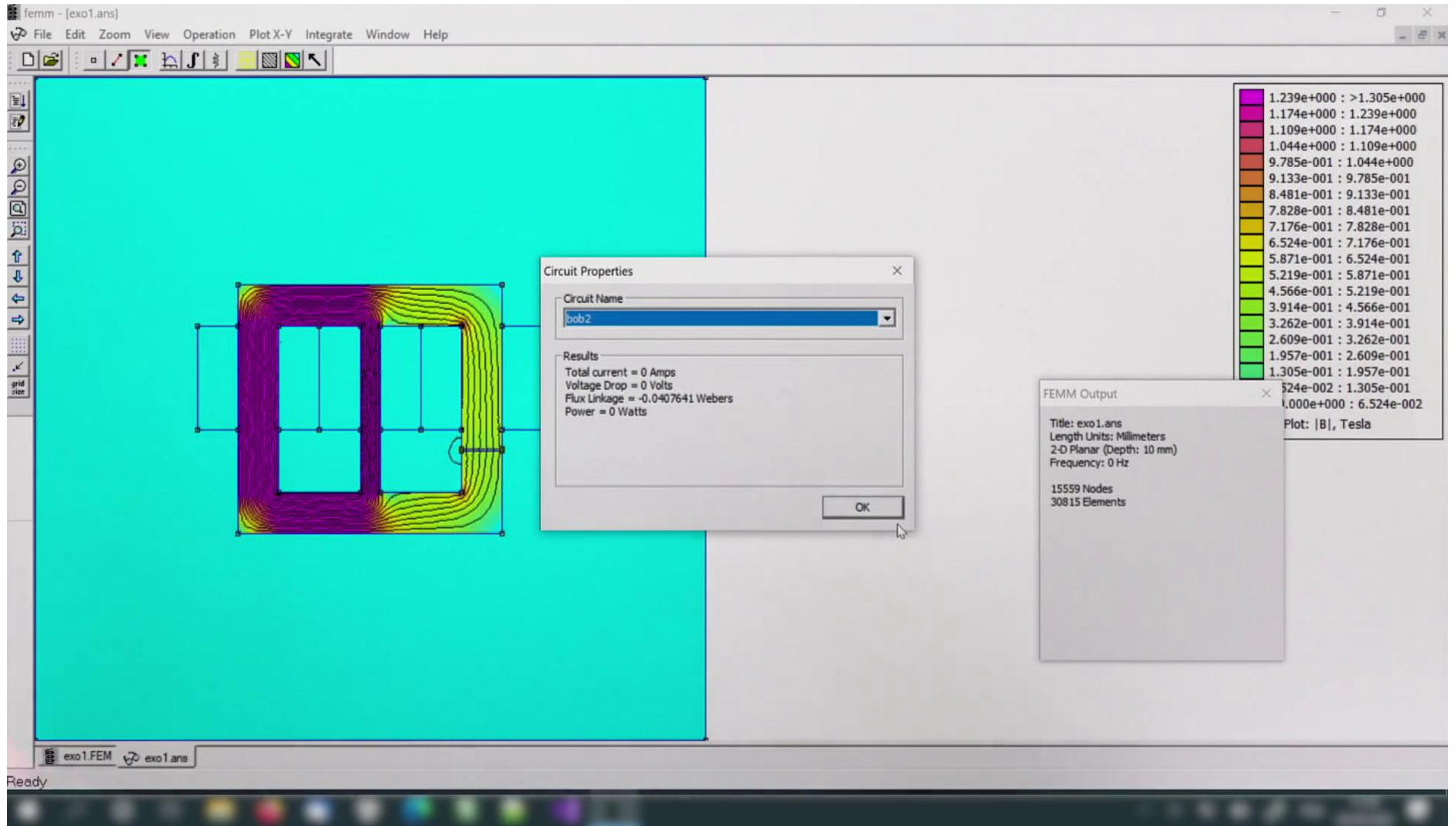
Là, on va voir qu'effectivement, on a une variation, on a une induction qui devient négative à l'intérieur de la partie ferromagnétique. Le flux descend, puis on a 0 ailleurs. Donc à ces endroits-là, on va avoir un petit peu de frange. Et puis autrement, on a un système qui va bien canaliser le flux. Ça, c'est pour visualiser les choses.

Notes

Summary



19m 28s

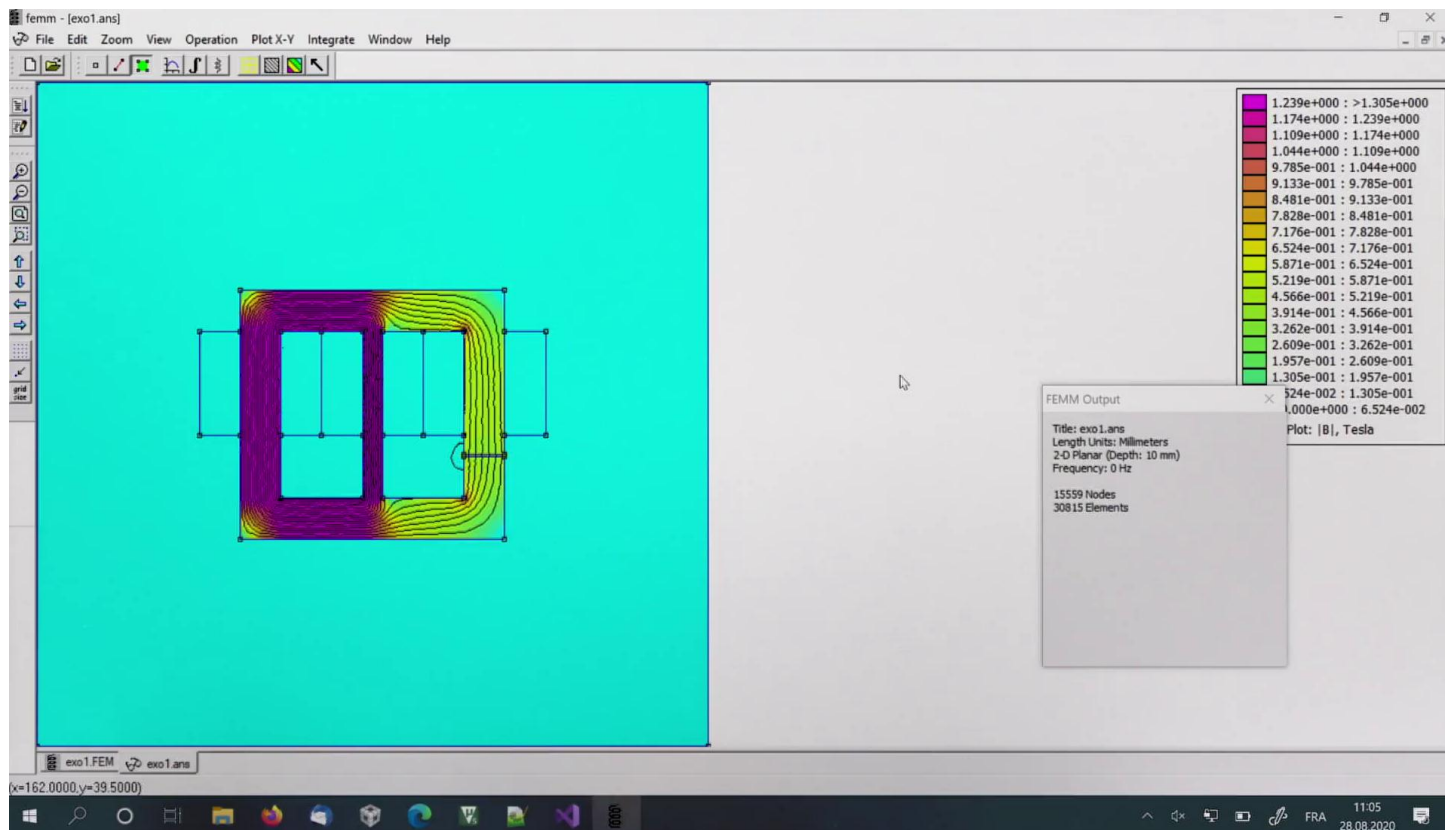


On peut également faire des calculs donc je peux faire une intégrale de l'induction à cet endroit-là. Je vais avoir un flux moyen. Un flux qui passe par cet endroit, y compris les franges dans ce cas-là et puis, une induction normale moyenne. Je vais pouvoir aussi faire des intégrales sur des surfaces. Typiquement, je pourrais calculer les pertes à cet endroit-là, donc toujours avec l'intégrale. Je vais pas en avoir puisque je n'ai pas spécifié un champ variable, donc c'est clair que je ne devrais pas avoir de perte. 0, vu que je n'ai pas de variation de champ. Mais dans le cas où je fais varier les champs, je peux calculer des pertes à cet endroit-là. Et puis enfin, je peux calculer des inductances. Typiquement avec les propriétés des circuits, je peux calculer des flux totalisés et puis des inductances. Flux/courant, flux totalisé sur courant Et puis, si je prends la deuxième bobine, en sachant que je n'ai pas mis de courant dans la deuxième bobine, là, je vais avoir que le flux totalisé C'est à moi de savoir à quoi il est dû, donc de pouvoir calculer l'inductance. En faisant Ψ/i , je peux calculer l'inductance mutuelle entre les deux bobines.

Notes

Summary





Je peux également calculer des forces quand j'ai des systèmes mobiles, soit en faisant des intégrales avec la force de Laplace ou bien comme on le verra plus tard, avec ce qu'on appelle les tenseurs de Maxwell, ou la dérivée de l'énergie ou de la co-énergie magnétique. Ça, c'est pour plus tard. Voilà, on a fait le tour des propriétés principales de ce logiciel.

Notes

Summary

21m 50s





- Calcul numérique:
 - Flux
 - Inductances
 - Forces,...
- Propriétés du problème:
 - Géométrie
 - Matériaux
 - Conditions aux limites
 - Circuits électriques
- Attention aux hypothèses

Aujourd'hui, nous avons vu que grâce à un logiciel de calcul par éléments finis, il était possible de calculer facilement les flux, les champs magnétiques et même des forces dans des systèmes électromécaniques. Pour ce faire, il s'agit d'introduire la géométrie, les matériaux, les conditions limites et les sources de potentiel magnétique dans le logiciel. Ce dernier va alors pouvoir calculer précisément ce qui se passe. Et on peut voir en un coup d'œil si on a un problème de fuite ou de saturation. Attention toutefois aux hypothèses que vous spécifiez ou que le logiciel assume. Il n'est pas toujours possible de faire des calculs précis en deux dimensions. Parfois, les propriétés des matériaux ne sont pas connues avec précision. Sans compter les nombreuses erreurs de saisie. Avec un logiciel de calcul par éléments finis, c'est facile d'avoir rapidement un résultat précis, mais c'est aussi facile d'être complètement à côté de la réalité, croyez-moi.

Notes

Summary



22m 21s