

UTILISATION RATIONNELLE DES METHODES DE CALCUL AUTOMATIQUE DES CHAMPS QUASI-STATIQUES

DEFOURNY Michel, LILIEEN Jean-Louis , PIROTTE Pol

INSTITUT D'ELECTRICITE MONTEFIORE
Transport et Distribution de l'Energie Electrique
Sart Tilman - B.28
B.4000 LIEGE

RESUME

On présente l'expérience d'une équipe de chercheurs qui développe depuis dix ans quatre méthodes de calcul numérique des champs électrostatiques et magnétostatiques.: Différences finies, Simulation de Charges, Eléments Finis et Intégrales de Surface.

Sur base de six exemples concrets, on met en évidence l'intérêt de chaque méthode selon le type de problème étudié.

*Actes du colloque "modélisation et calcul en électromagnétisme et applications" MODELEC - colloque GAMNI-SEE-EDF 22-24 Oct 84
Collection Méthodes numériques dans les sciences de l'ingénieur, édition PLURALIS, publiés par A. Bossavit, pp 123-136, 1984*

ISBN : 978-2-86216-009-2

RATIONAL USE IN QUASI STATIC FIELDS COMPUTATION METHODS

DEFOURNY Michel, LILLEN Jean-Louis , PIROTTE Pol

INSTITUT D'ELECTRICITE MONTEFIORE

Transport et Distribution de l'Energie Electrique

Sart Tilman - B.28

B.4000 LIEGE

SUMMARY

We present the experience of a research team which has been developing for ten years four numerical computation methods in electrostatic and magnetostatic fields : Finite Differences, Charge Simulation, Finite Elements and Surface Integrals.

Based on six actual cases, the advantages of each method are shown off according to the studied problem.

INTRODUCTION

Depuis l'avènement des méthodes numériques modernes, il est possible de résoudre les problèmes requis par des équations différentielles dans des milieux de géométrie complexe. Ce sont bien entendu les cas les plus courants en pratique, et cela explique les importants développements que ce domaine connaît depuis de nombreuses années déjà.

De très nombreuses méthodes ont été développées dans ce but, et chaque centre d'étude a choisi celle qui lui semblait la plus appropriée. Plus spécifiquement aux domaines électriques, nous pouvons retenir les méthodes de Simulation de Charges (SC)/19/, des Eléments Finis (EF)/18, 20/, des Différences Finies (DF)/ un peu tout le monde au début/, et autres Monte-Carlo, transformations conformes, Sander etc... Plus récemment est apparue la méthode des Eléments Frontières ou des Intégrales de Surface (IS)/1, 6, 16/.

Toutes ces méthodes sont restées en évolution constante, de manière à élargir au maximum leur champ d'applicabilité, chose qui est souvent possible, mais pas toujours très rationnelle. Notre équipe de recherche à l'Université de Liège a opté pour une autre démarche. Elle a développé ces dix dernières années plusieurs logiciels sur quatre grandes méthodes de résolution (DF, SC, EF, IS)/4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 21/ pour le calcul du champ électrique ou magnétique (linéaire ou non) en régime stationnaire. Nous voudrions faire part de notre expérience dans l'utilisation de ces méthodes : choix de la méthode en fonction du problème à traiter, rapidité de la formation du jeu de données, temps d'exécution, présentation des résultats... Toutes ces méthodes ont déjà été comparées entre elles du point de vue de leur exactitude /9,12/ et il va sans dire que les résultats étaient concluants.

CHOIX DE LA METHODE DE RESOLUTION

Nous avons synthétisé dans la tableau présenté au tabl. 1 notre opinion sur les différents points relatifs à l'étude d'un problème de répartition de potentiel et de champ électrique.

Remarque

Pour les DF, ce jugement est sur certains aspects lié au choix qui a été fait lors de l'élaboration du logiciel : le fait d'avoir choisi un maillage rectangulaire facilite le tracé des équipotentiels, une certaine automatisation des entrées/sorties, et diminue le temps de calcul et l'espace mémoire, mais rend cette méthode tout à fait inadéquate pour l'optimisation des formes des électrodes, où il est nécessaire de pouvoir modifier les positions des surfaces d'une manière continue. Les autres aspects envisagés sont liés à la méthode elle-même. Pour mieux comprendre ce tableau, nous invitons le lecteur à lire l'annexe 1 où sont brièvement décrits les codes de calcul utilisés dans notre Service.

	Simulation de charges SC	Différences finies DF	Eléments finis EF	Intégrales de surface IS
Espace considéré	bidimensionnel ou tridimensionnel	bidimensionnel	bidimensionnel, éventuellement tridimensionnel	bidimensionnel* ou tridimensionnel
Limitation espace	sans problème tient compte implicitement des conditions à l'infini	introduction d'un processus itératif préalable au traitement	introduction d'un processus direct	sans problème, tient compte implicitement des conditions à l'infini
Calcul des capacités	sans problème puisque les charges sont directement fournies par la résolution	demande le traitement de plusieurs cas $V_i = \delta_{ij}$ *	le traitement des divers cas ($V_i = \delta_{ij}$) peut se traiter en un seul passage	il suffit d'intégrer la densité de charge* fournie par la résolution, puis comme pour SC
Multidiélectrique	non encore programmé mais plus complexe que par les autres méthodes*	sans problème	sans problème	sans problème tant qu'il n'y a pas de limite entre 3 diélectriques
Electrode à potentiel indéterminé	sans problème	on doit passer par le calcul des capacités (augmentation CPU)*	sans problème	sans problème*
Automatisation	aisée pour des géométries simples	aisée	complexe pour des éléments de type quelconque	plus aisée que par les E.F. (maillage d'un degré inférieur)
Tracé des équipotentielles	aisé mais coûteux	aisé	moins aisé et coûteux	coûteux*
Mémoire requise	vite élevée (matrice du système pleine)	faible (exploitation des creux de la matrice par une méthode itérative avec surrelaxation)	(exploitation des creux moins grands que dans le cas des DF) par une méthode frontale)	vite élevée (matière du système pleine mais de dimension inférieure à celle à celle des EF)
Temps CPU (lié à la mémoire)	vite élevée	faible	moins faible	vite élevée (3D)
Connaissance de la répartition du potentiel	le programme fournit les charges; on doit ensuite calculer le potentiel aux points désirés	le programme fournit directement le potentiel en tous les noeuds du maillage	id. aux DF	sur les surfaces discrétisées, directement par la résolution; dans l'espace, demande un calcul ultérieur
Connaissance du champ électrique	se calcule à posteriori aux points désirés (formule analytique)	à calculer à posteriori; quelques limitations	peut être fourni directement en tous les noeuds du maillage (et ailleurs)	sur les surfaces discrétisées, la composante normale est fournie par la résolution. Ailleurs, demande un calcul ultérieur
Problème type	diélectrique homogène bi ou tridimensionnel, espace infini, géométrie simple (ex. lignes HT postes HT)	multidiélectriques bidimensionnels, espace infini ou non, géométrie de préférence à caractère rectiligne	multidiélectriques bidimensionnels (éventuellement tridimensionnel) espace confiné de préférence, géométrie quelconque	multidiélectrique tridimensionnel espace infini, géométrie quelconque.

* aspects non encore introduits dans nos codes de calcul.

Tableau I

EXEMPLES : QUELQUES CAS PARTICULIERS

1. Répartition du potentiel au sein d'un transformateur de potentiel à isolation SF₆ (fig. 1)

C'est un problème multidiélectrique, en espace confiné, dont la géométrie peut être considérée comme axisymétrique. Le tracé des équipotentiels est requis, ainsi que la connaissance du champ sur l'électrode haute tension. Ce calcul a été traité par les méthodes EF et DF.

L'orthogonalité, et donc la relative simplicité des données font que l'automatisation de la génération pour la méthode DF est assez réduite. Dans ce cas-ci, les formes étant relativement simples, la construction du maillage en elle-même est aisée. Les différents types de points sont repérés par un système de codage original.

Dans le cas des EF, la génération est fortement automatisée, le jeu de données est très simple à constituer, et peut être presque entièrement recopié à partir des cotations que l'on trouve sur le plan, ce qui limite très fort le risque d'erreur.

On peut évaluer le temps de préparation des données dans l'un et l'autre cas à 1h/2 pour les DF et 1/4h pour les EF. Les temps de calcul sur DECSYSTEM 2050 (Digital) sont d'environ 10 et 16 sec pour les EF.

Dans la mise au point d'appareillage, il est souvent nécessaire de modifier l'une ou l'autre dimension ou grandeur. Cela se fait extrêmement simplement avec notre programme de génération pour les EF, vu la généralité des données à introduire, et est encore facilité par la possibilité de définir des paramètres. Par exemple, ici, on désire modifier le rayon de courbure de l'électrode HT dans l'idée d'en optimiser la forme. Le temps nécessaire à cette modification dans le jeu de données est tout à fait négligeable.

2. Répartition du potentiel et du champ dans un transformateur d'intensité (fig. 2)

C'est toujours un problème multidiélectrique à géométrie axisymétrique, mais placé ici en espace infini, et comportant des électrodes de répartition à potentiel flottant. Cette dernière caractéristique rend l'emploi des DF extrêmement lourd. La géométrie complexe (angles presque vifs de la tête, électrodes de répartition très fines limites de diélectriques,...) rend également très malaisé l'utilisation de la méthode de SC. Nous employons donc la méthode des EF, avec un traitement spécial pour tenir compte de l'espace infini. Le tracé des équipotentiels est montré en figure 6. La préparation du jeu de données correspondant à cette géométrie extrêmement complexe n'a pas demandé plus d'une heure de travail. L'ensemble génération et calcul s'est effectué en 1 min 12 sec cpu sur DECSYSTEM 2050.

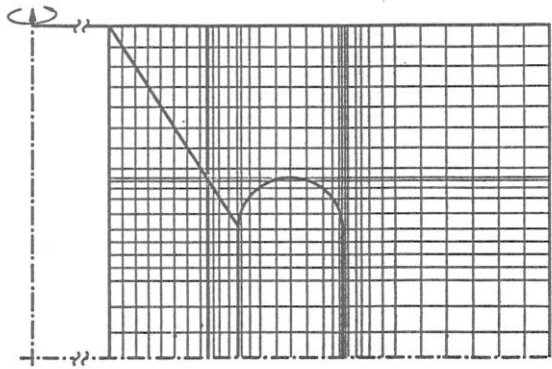


Fig. 1 a)

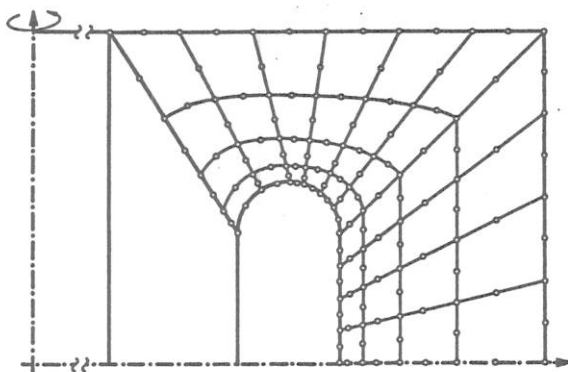


Fig. 1 b)

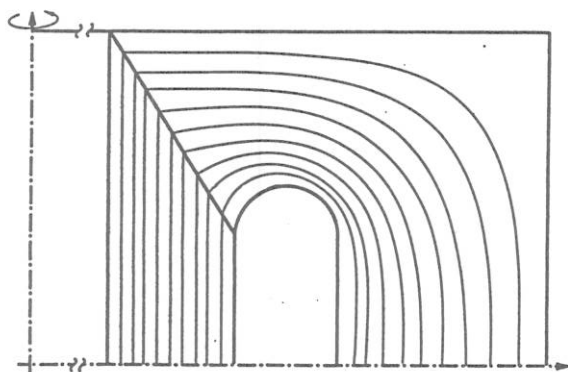


Fig. 1 c)

Fig. 1 Transformateur de potentiel
 a) maillage DF
 b) maillage EF
 c) équipotentiellles

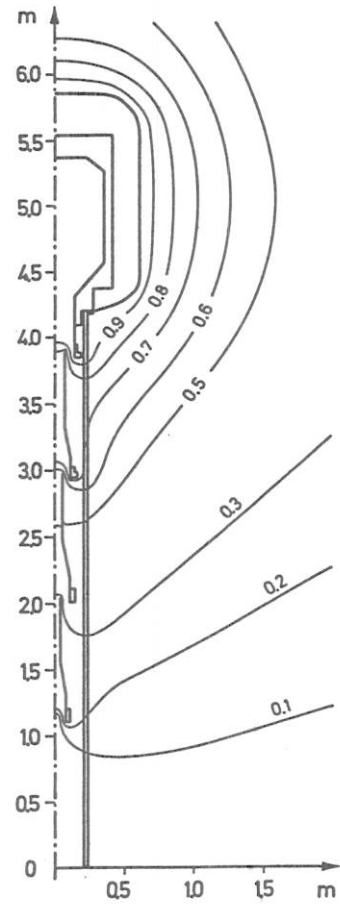


Fig. 2

Transformateur d'intensité : équipotentiellles

3. Répartition du champ électrique sous un parallèle-barre (fig. 3-4)

Le problème est tridimensionnel, en espace infini, et seul le relevé du champ en quelques points est demandé. C'est typiquement un cas à traiter par la SC. La taille des parties actives par rapport à la dimension du domaine étudié rendrait tout à fait prohibitif un maillage d'espace de type DF ou EF. Le maillage de la surface des câbles et l'étude par la méthode est IS n'est pas du tout nécessaire vu la géométrie particulière de ce cas, et pourrait même être déconseillée en raison d'une trop grande disproportion des deux dimensions (longueur/largeur) des éléments.

Les résultats ont été confrontés à la mesure par un appareillage mis au point dans notre Institut basé sur une géométrie à 2 hémisphères /8/. La génération de la position des charges est semi-automatique. La préparation a cependant demandé quelques heures de réflexion pour limiter la taille du problème.

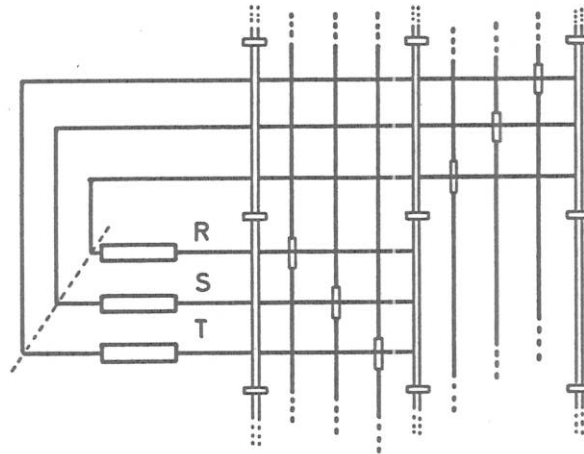


Fig. 3 - Plan du parallèle-barre

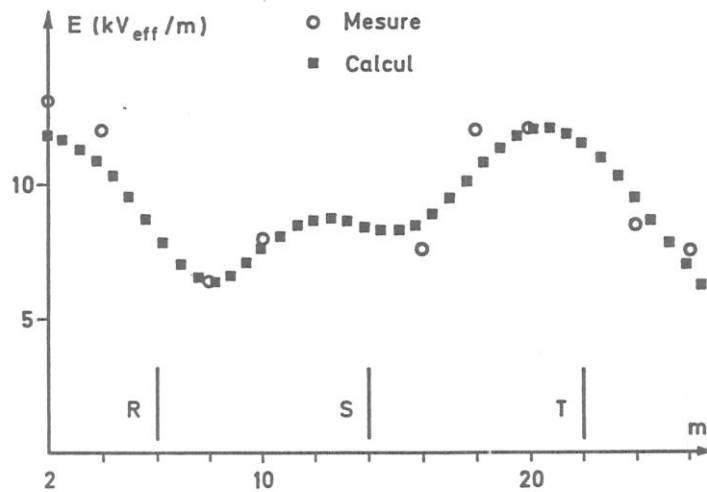


Fig. 4 - Comparaison calcul/mesure

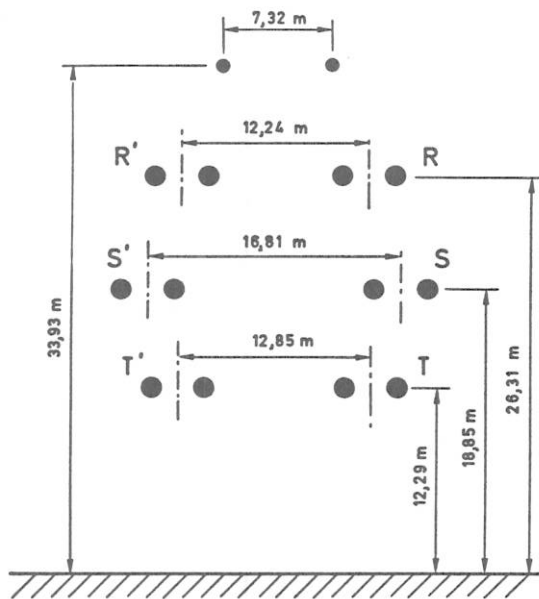


Fig. 5
Armement de la ligne

4. Répartition du champ électrique sur les sous-conducteurs d'une ligne HT (faisceaux de 2 conducteurs), détermination des gradients maxima et moyens (fig. 5)

Le problème est bidimensionnel, en espace infini, et seule la connaissance du champ est requise. La géométrie est très bien adaptée à la méthode SC, car le diamètre des sous-conducteurs est très petit vis-à-vis de la distance du sol, ce qui interdit toutes les méthodes nécessitant une discrétisation de l'espace (EF et DF) pour les mêmes raisons que celles exposées dans le cas précédent. L'emploi d'une méthode IS bidimensionnelle par contre pourrait être envisagée. Notre programme par SC fournit pour chaque phase la valeur maximale instantanée sur une période. Le tableau 2 donne les résultats obtenus. La génération est semi-automatisée; le temps de préparation des données est négligeable.

Tableau 2

Valeur maximale du champ sur les différents sous-conducteurs

Faisceau	S.C.	Emax (kV/cm)	temps (ms)
R'	1	13.4	2
	2	13.7	2.1
S'	1	15.5	5
	2	15.3	5
T'	1	14.3	8
	2	14.5	8
R	1	13.7	2.1
	2	13.4	2
S	1	15.3	5
	2	15.5	5
T	1	14.5	8
	2	14.3	8
G	1	3.5	1
	2	3.5	1

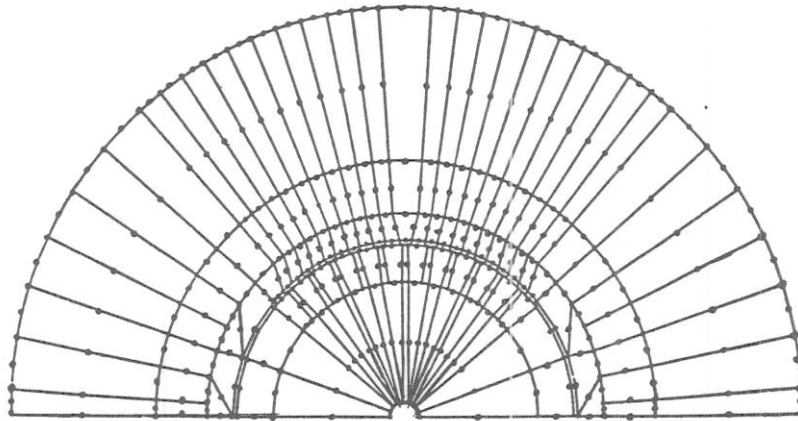


Fig. 6 a)

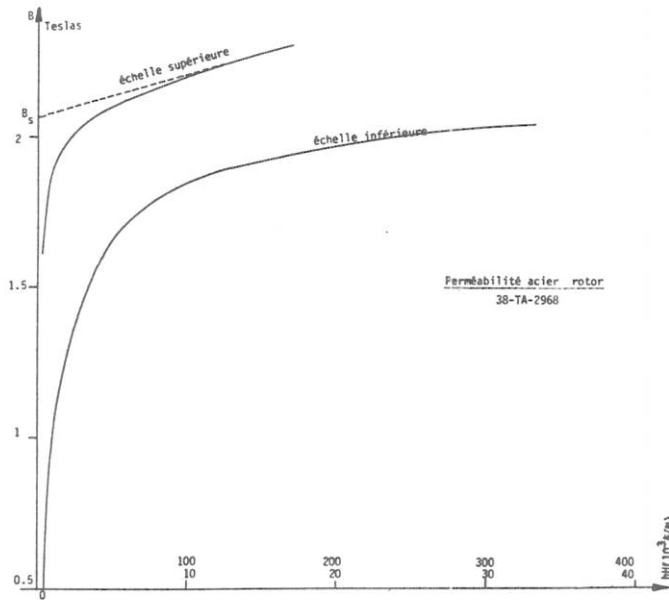


Fig. 6 b)

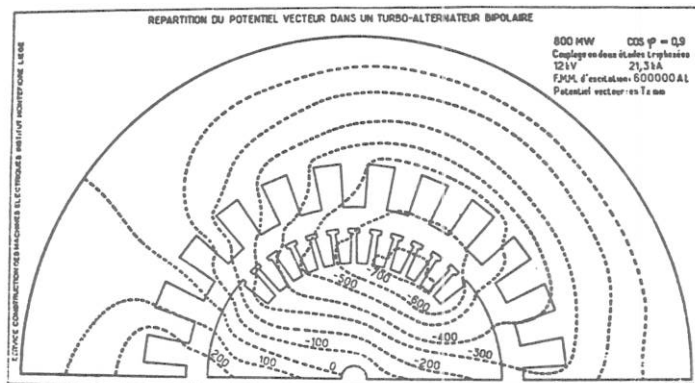


Fig. 6 c)

Fig. 6 - Turboalternateur
 a) maillage EF b) courbe de saturation c) lignes de champ

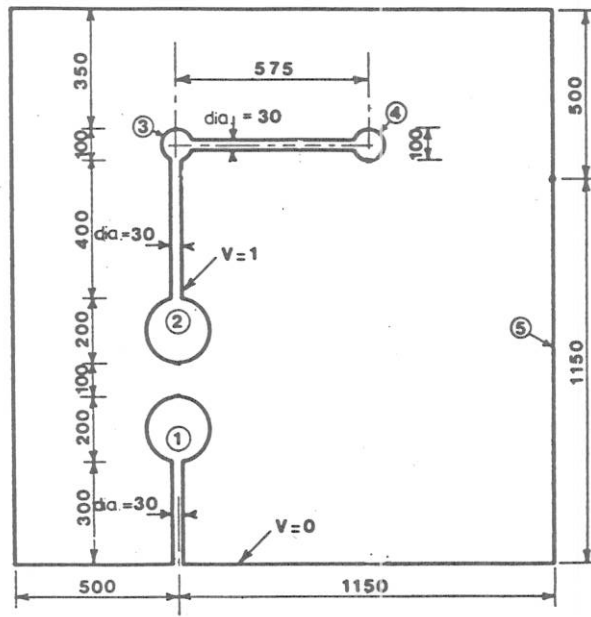


Fig. 7 - Géométrie du problème

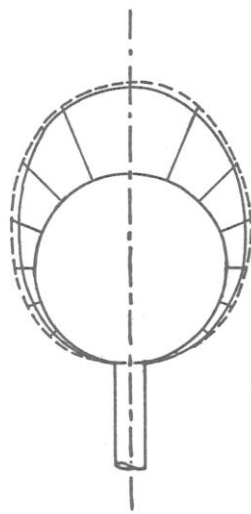


Fig. 8 a)

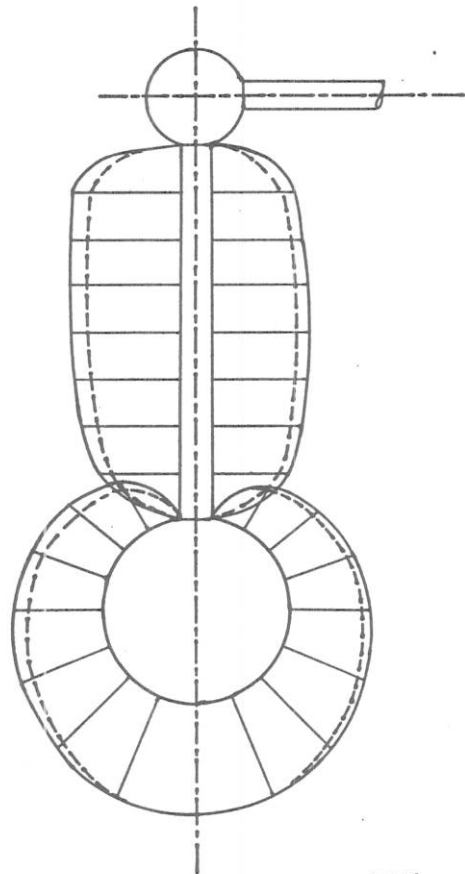


Fig. 8 b)

0.1 kV/cm

Fig. 8 - Comparaison des valeurs du champ en tenant compte (trait plein) ou non (trait pointillé) de la présence des murs

a) électrode BT

b) électrode HT

5. Répartition du champ magnétique stationnaire en régime saturé dans un turbo-alternateur (fig. 6)

C'est un problème bidimensionnel en espace confiné, faisant intervenir des domaines de perméabilités différentes avec caractéristiques non-linéaires. Le tracé des équipotentielles est requis, ainsi que la connaissance des zones fortement saturées. Un programme de génération particulier à ce type de problème a été mis au point dans notre Institut /17/. La résolution se fait par les EF. En effet, à l'inverse des cas précédents, les méthodes qui ne discrétisent pas les domaines étudiés seront écartées en raison de la saturation.

6. Répartition du potentiel dans une salle HT en tenant compte de la présence des murs ou non (fig. 7-8) (Problème tiré de /2/)

C'est un problème typiquement tridimensionnel, à géométrie relativement complexe, en espace confiné ou infini suivant le cas. Les méthodes avec discrétisation de l'espace sont fort mal adaptées en raison de l'aspect tridimensionnel d'abord (difficulté de la génération), et par les dimensions de l'espace à mailler ensuite, qui est très important en regard des éléments conducteurs. Dans le cas en espace confiné, la méthode de SC a de grosses difficultés à modéliser correctement les angles vifs apparaissant entre les murs de la pièce. La méthode des IS paraît donc bien la mieux adaptée à ce type de problème. La préparation du jeu de données de ce cas complexe a demandé 2 heures.

CONCLUSIONS

Chaque méthode numérique conserve ses avantages propres et ses domaines d'investigations de prédilection.

La méthode des DF met en oeuvre des moyens assez légers, mais ne traitera que des cas simples.

La méthode des EF, assistée par des programmes de génération de données et de traitement des résultats reste très performante en 2D. La facilité par laquelle elle tient compte des milieux non linéaires laisse prévoir une vie encore fort longue à cette méthode.

La méthode des IS semble très prometteuse. La diminution du degré de son maillage en fait l'outil 3D par excellence. Elle paraît également prédestinée pour les problèmes d'optimisation et de CAO, car elle ne demande la modélisation que des surfaces.

Ces deux dernières méthodes pourront être couplées pour profiter de leurs avantages respectifs, par exemple pour les problèmes en espace infini comportant des domaines non-linéaires.

La méthode de SC restera associée aux structures élancées des lignes et des postes où elle semble la plus appropriée, tant par la géométrie du problème que par l'aspect infini du domaine étudié.

En conclusion, nous pouvons donc dire qu'il n'y a pas une méthode meilleure que les autres; il y a simplement plusieurs méthodes, chacune meilleure que l'autre dans son domaine propre. Avant de développer une méthode de calcul de champ, il faut donc connaître les objectifs majeurs que l'on poursuit et faire son choix en conséquence. Nous espérons par cet article avoir contribué à éclairer celui-ci.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société belge BALTEAU qui leur a procuré de nombreuses données sur les appareillages électriques HT.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ B. Ancelle : "Emploi de la méthode des équations intégrales de frontière et mise en oeuvre de la conception assistée par ordinateur dans le calcul des systèmes électromagnétiques, Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble 1979.
- /2/ M.D.R. Beasley, M.A. Pickles, G. d'Amigo, L. Beretta, M. Fanelli, G. Giusepetti, A. di Monaco, J.P. Grégoire, M. Morin : "Comparative study of three methods for computing electric fields" Proc. I.E.E., vol. 126, n° 1, january 1979.
- /3/ C. Brebbia, S. Walker : "Boundary element techniques in engineering", Newnes-Butterworths, London-Boston, 1980
- /4/ S. Cescotto, J.L. Lilien : "Application d'un principe variationnel incrémentiel au calcul par éléments finis de la répartition du champ magnétique dans les machines électriques", Bulletin Scientifique de l'AIM, 1977, n° 1, p. 25-40.
- /5/ CETIM : "Application de la méthode des équations intégrales à la mécanique" CETIM Senlis 1978.
- /6/ J. Daffe, R.G. Olsen : "An integral equation technique for solving rotationally symmetric electrostatic problems in conducting and dielectric material", IEEE Trans. Pas 98, sept-oct. 1979, p. 1609.
- /7/ M. Defourny : "Faisabilité de l'optimisation de la forme des électrodes basée sur un calcul de champ électrique par la méthode des équations intégrales", Bulletin Scientifique de l'AIM, n° 1-2, 1983.
- /8/ J. Deuse : "Détermination de la distribution du champ électrostatique dans les installations à haute tension", Thèse de Doctorat, Institut Montefiore, Université de Liège, 1976.
- /9/ J. Deuse, J.L. Lilien, L. Vandermeeren : "Les méthodes de calcul numérique des champs électriques, leurs possibilités et leurs limitations", Bulletin Scientifique de l'AIM, 1977, p. 203-212.
- /10/ J. Deuse, P. Pirotte : "Three dimensional electric field distribution near high voltage lines", International High Voltage Symposium, Zurich 1975.
- /11/ J. Deuse, P. Pirotte : "Calculation and Measurement of electric field strength near H.V. structures", CIGRE 36-03, 1976.
- /12/ C. Grégoire, J.L. Lilien, P. Pirotte, L. Vandermeeren : "Methodes de calcul automatique de l'intensité du champ électrique", Bulletin Scientifique de l'AIM, 1980, p. 5-11.

- /13/ IEEE Corona and Field Effects Subcommittee Report : "A survey of methods for calculating transmission line conductor surface voltage gradients", IEEE PES Winter Meeting, F.79 257-7.
- /14/ J.L. Lilien, P. Pirotte : "Transmission line conductor surface voltage gradients. Comparison between Mangoldt's and Charge Simulation methods", 3d International Symposium High Voltage Engineering, Milan 1979, 12.15
- /15/ J.L. Lilien, P. Pirotte : "Laboratory tests and normal operation regarding the electric field intensity", 4th International High Voltage Symposium, Athens 1983 12.03
- /16/ T. Misaki, H. Tsuboi, K. Itaka, T. Hara : "Computation of three dimensional electric field problems by a surface charge method and its application to optimum insulator design", IEEE Trans PAS, March 1982, p. 627.
- /17/ Ch. Nowak : "Application de la méthode des éléments finis au calcul des turbo-alternateurs", COMPUMAG 1978, Grenoble 11.1.
- /18/ P. Rafinejad, J.L. Coulomb, J.C. Sabonnadière : "Elaboration de modèles informatiques interactifs dans les calculs de machines à induction", Revue Générale d'Electricité, sept. 1975.
- /19/ H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss : "A charge simulation method for the calculation of HV fields", IEEE Trans PAS 93, sept-oct. 1974, p. 1660-1668.
- /20/ P. Sivester, P. Rafinejad : "Curvilinear Finite Elements for Two-Dimensional Saturable Fields", IEEE PES Winter Meeting, New-York.
- /21/ L. Vandermeeren : "Recherche des contraintes diélectriques dans les câbles à isolation par voie numérique", Thèse de Doctorat, Institut Montefiore, Université de Liège, 1979.

ANNEXE

CARACTERISTIQUES DES LOGICIELS IMPLEMENTES AU SERVICE TDEE DE DE L'UNIVERSITE DE LIEGE

1. Différences finies

- Calculs de répartition de potentiel pour des problèmes plans ou à symétrie axiale par une méthode de surrelaxation
- Maillage rectangulaire
- Calcul du champ à partir d'une interpolation du potentiel sur trois points
- Domaines multi-diélectriques
- Simulation d'espaces non bornés
- Tracé d'équipotentiellles
- Raffinement du calcul dans certains zones
- Entrée des données facilitée par un codage original
- Plan de symétrie

2. Simulation de charge

- Calculs pour des problèmes tridimensionnels ou plans
- Charges linéiques ou circulaires (fondamentales et harmoniques)
- Programmes de génération de données
- Calcul du potentiel et du champ en certains points
- Tracé d'équipotentiellles
- Plans de symétries
- Calcul des capacités
- Electrodes à potentiel indéterminé

3. Eléments finis

- Calculs pour des problèmes plans ou à symétrie axiale
- Domaines multidiélectriques
- Tracé d'équipotentiellles
- Programmes de génération de données et de présentation des résultats
- Calcul des capacités
- Electrodes à potentiel indéterminé
- Simulation de domaines non bornés
- Présence de charges volumiques, surfaciques ou linéiques

4. Intégrales de surface

- Calcul en espace tridimensionnel
- Domaines multidiélectriques
- Symétries
- Programme de génération de données
- Conditions limites de Neumman