

METHODES DE CALCUL AUTOMATIQUE DE L'INTENSITE DU CHAMP ELECTRIQUE

PAR

C. GREGOIRE, J.L. LILLEN, P. PIROTTE et L. VANDERMEEREN (*)

Université de Liège
Institut d'Electricité Montefiore
Belgique

R E S U M E

Nous comparons deux techniques de résolution du calcul du potentiel et du champ électrique qui sont particulièrement adaptées aux structures rencontrées dans les postes blindés à haute tension isolés au SF₆ : la méthode des différences finies et celles des éléments finis.

La comparaison se complète par des résultats expérimentaux et autres publiés récemment.

1. Introduction

C'est un lieu commun que de rappeler l'extraordinaire impact des calculateurs numériques comme outil de recherche dans le domaine des sciences et des techniques. Il est évident que la formulation même des problèmes reste identique mais là où les méthodes de résolutions analytiques ou analogiques se heurtent à des limitations inhérentes à leur capacité de traitement, grâce aux ordinateurs on peut porter le problème plus en avant et de la sorte envisager avec assurance une meilleure connaissance des grands phénomènes qui régissent les phénomènes.

Dans le domaine particulier de la détermination de l'intensité du champ électrique, grandeur qui sollicite les isolants utilisés en électrotechnique, il est extrêmement utile, pour ne pas dire impérieux, de connaître cette valeur avec une bonne précision. L'avènement des très hautes tensions, les contingences technico-économiques, l'amélioration de la qualité et de la fiabilité des composants des réseaux concurrent à la maîtrise, de plus en plus fine, de la connaissance des contraintes qui fixent les limites d'utilisation des diélectriques.

Utiliser l'ordinateur n'est pas un luxe, c'est une nécessité qui résulte de l'évolution des besoins et des possibilités offertes par cet outil de calcul.

Au cours de ces quinze dernières années, de nombreux travaux ont eu comme motivation le traitement de l'équation de Laplace ($\Delta V = 0$) en vue de (*) Ingénieur à Intercom S.A., 1000 Bruxelles.

résoudre les problèmes posés en particulier par l'augmentation des niveaux de tension. Outre les méthodes analytiques et les techniques de résolution par voie numérique, il ne faut pas omettre les méthodes analogiques (cuve rhéographique, papier résistif, graphiques (méthode de Lehmann) et utilisation de modèles réduits qui ont rendu et rendent encore de nombreux services.

La résolution de l'équation de Laplace s'adapte aisément à divers types de formulations parmi lesquelles on peut citer les méthodes :

- de transformation conforme,
- des images,
- de Sander,
- de simulation de charges ou de charges équivalentes,
- des éléments finis,
- des différences finies,
- de Monte Carlo, etc.

Cependant, il est coutumier d'utiliser plutôt une des quatre dernières méthodes citées.

A l'Institut d'Electricité Montefiore (Université de Liège), nous avons, dès 1972, démarré la mise au point de programmes en vue de quantifier les contraintes diélectriques apparaissant dans les réseaux de transport d'énergie électrique. Trois étapes majeures ont émaillé nos travaux au cours de ces dernières années.

La première [4] avait pour objectif le calcul de l'intensité du champ électrique au voisinage immé-

La deuxième étape [5] était axée sur des structures confinées (câbles à isolation gazeuse, transformateurs,...) et il s'est avéré que la méthode par différences finies présentait des atouts certains dans ce type de problèmes.

Quant à la troisième étape [6], elle comporte l'application de la technique des éléments finis, qui serait sans doute la plus souple d'exploitation (respect aisés des contours curvilignes et autres, problèmes bi et tridimensionnels) si l'on ne devait concéder une part, trop importante encore actuellement, à la discrétisation du problème étudié.

Un rapport publié dernièrement [2] tente d'aider l'utilisateur dans le choix de l'une ou de l'autre de ces trois méthodes, compte tenu des problèmes particuliers à résoudre.

Tout récemment un travail [1] très intéressant publié conjointement par l'E.D.F. (France), le C.E.G.B. (Royaume-Uni) et l'E.N.E.L. (Italie) compare les méthodes par charges équivalentes, de Monte Carlo et par éléments finis appliqués à des structures très diversifiées (un ou plusieurs diélectriques, angles vifs, bi et tridimensionnels).

Les techniques de résolution par différences finies (D.F.) et éléments finis (E.F.) nous paraissent particulièrement adaptées aux structures rencontrées dans les postes blindés à haute tension isolés au SF₆, caractérisées par la présence de plusieurs diélectriques et par le confinement du domaine étudié.

Dans ce rapport, nous présentons les résultats obtenus par application de ces deux méthodes à la résolution de deux cas particuliers, repris de la publication [1], qui jouissent des mêmes caractéristiques.

Nous étudierons la structure représentée à la fig. 1, qui correspond à celle étudiée dans [1].

La fig. 2 reprend le réseau des équipotentielles tracées de 0 à 1 p.u., par pas de 0,1 p.u. On peut voir l'impact de la présence d'un milieu diélectrique de permittivité deux fois plus élevée que celle de l'air (courbes en pointillés) : il repousse les équipotentielles vers l'électrode, ce qui augmente le champ au niveau de la couche « d'air » située près de l'électrode et le diminue à l'extérieur de cette même couche, puisque l'intégrale entre les deux électrodes reste constante (voir fig. 3).

Le calcul a été effectué numériquement par la méthode des différences finies (D.F.) et par les éléments finis (E.F.).

En D.F., en tenant compte du plan de symétrie (Z = 0,23 m), nous avons discrétisé l'espace con-

fini en mailles rectangulaires à pas variables (5 676 nœuds). Le calcul a été effectué sur un IBM 370/158 et a nécessité 185 s de temps C.P.U.

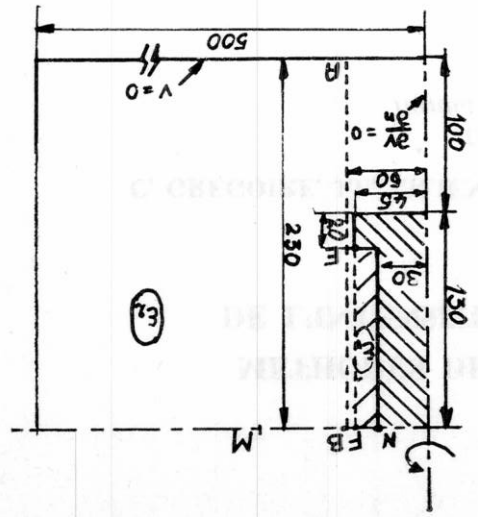


Fig. 1.

cas 1 : $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ cas 2 : $\epsilon_1 = 1 ; \epsilon_2 = 2$

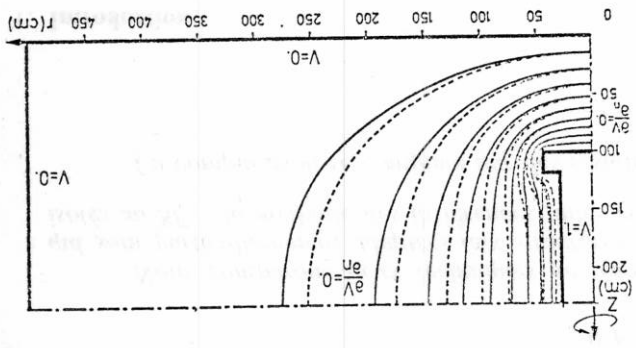


Fig. 2.

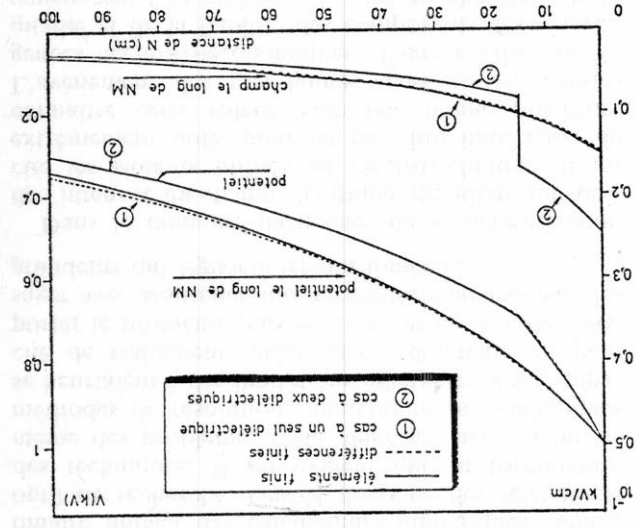


Fig. 3.

Le calcul a été effectué numériquement par la méthode des différences finies (D.F.) et par les éléments finis (E.F.).

En D.F., en tenant compte du plan de symétrie (Z = 0,23 m), nous avons discrétisé l'espace con-

fini en mailles rectangulaires à pas variables (5 676 nœuds). Le calcul a été effectué sur un IBM 370/158 et a nécessité 185 s de temps C.P.U.

TABLEAU 1.A		Potentiel le long de AB																											
r	Z	M-C				S-C				E-F				R-E				D-F				E-F							
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2				
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	,052	,056	,203	,200	,051	,201	,197	,053	,057	,187	,191	,056	,056	,19	,355	,378	,804	,198	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	35	,203	,203	,378	,200	—	,375	,368	,368	,187	,365	,355	,378	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	60	,371	,371	,487	,483	—	,483	,476	,476	,47	,47	,459	,487	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	72,5	,474	,474	,622	,616	,62	,616	,608	,608	,6	,6	,59	,62	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	85	,616	,616	,790	,806	,806	,806	,777	,777	,76	,76	,791	,782	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	97,5	,790	,874	,874	,841	,841	,841	,877	,868	,85	,85	,879	,868	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	110	,874	,874	,872	,841	,841	,841	,877	,868	,85	,85	,879	,868	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	123	,847	,847	,859	,841	,841	,841	,877	,868	,85	,85	,879	,868	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	135	,798	,798	,799	,748	,748	,748	,799	,735	,83	,83	,852	,852	,804	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	160	,764	,764	,768	—	—	—	,767	,676	,775	,775	,801	,772	,801	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	185	,755	,755	,765	,675	,675	,675	,762	,66	,744	,744	,769	,769	,801	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	210	,77	,77	,765	,6	,6	,6	,764	,658	,745	,745	,77	,77	,801	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485
	230	,76	,76	,765	,671	,671	,671	,763	,657	,745	,745	,77	,77	,801	,198	,054	,054	,054	,054	,054	,054	0	0	,369	,376	,369	,376	,477	,485

(Central Processing Unit) et une mémoire de 244 K bytes (ou 61 K mots de 32 bits). Nous avons opté pour un schéma de résolution qui discrétise l'équation [2] :

$$\int_s \underline{D} \cdot \underline{n} \, ds = 0 \text{ (en l'absence de charges).}$$

On obtient une relation linéaire entre chaque nœud et les 4 nœuds qui lui sont adjacents. La méthode de résolution du système d'équations est itérative avec surrelaxation.

La préparation et la vérification des données a pris, pour les deux cas traités, 4 « heures-homme » pour les données relatives au potentiel, au champ et au tracé des équipotentielles.

En E.F., nous avons utilisé des éléments quadrangulaires isoparamétriques du second degré en la variable potentiel. Le problème a été traité en une seule fois et comportait 153 nœuds et 358 éléments. La méthode de résolution du système d'équations est « frontale » : c'est une résolution directe qui effectue assemblage et résolution simultanément (la largeur de front ou nombre d'équations à « traiter » simultanément a toujours été < 44).

Le calcul a été effectué sur l'ordinateur de l'Institut (DEC system 2050, regroupant un PDP11 et un PDP20) en 88 s de temps CPU (avec un temps de cycle comparable à celui de l'IBM 370/158).

La préparation et la vérification des données, grâce à un programme de génération automatique, ont pu être effectuées en une matinée (4 heures-homme). Les tableaux 1.A à 3.A et 1.B à 3.B représentent les valeurs tirées de [1] où nous avons ajouté les résultats que nous avons obtenus. Les figures 3 à 5 reprennent ces calculs sous forme de courbes pour les deux méthodes utilisées et les deux cas traités (sauf pour la fig. 4 où, par souci de clarté, seul le cas à un diélectrique a été tracé).

Il est certain que, des méthodes qui peuvent être utilisées pour ce type de problème, les D.F. et les E.F. sont les plus appropriées, comme le font d'ailleurs également remarquer les auteurs de [1] et [2]. En effet, la méthode de simulation de charges est très sensible aux « coins » et le positionnement des charges près du contour de l'angle vif doit être très minutieux faute de ne pas respecter le contour exact de l'électrode entre les « points de contour ». Un phénomène d'oscillation, surtout pour les valeurs du champ, apparaît alors comme on peut le remarquer, dans [1], fig. 8 et 11 et [2], fig. 7.

La méthode de Monte Carlo est rapide et facile à mettre en œuvre et conduit à des résultats fiables (bien que le cas à plusieurs diélectriques est déjà plus difficile à traiter), mais elle est particulièrement d'application lorsqu'on ne s'intéresse à la valeur du potentiel et du champ qu'en peu de points.

Les méthodes E.F. et D.F. fournissent, quant à elles, directement (aux nœuds du maillage et même à l'intérieur des E.F.) la valeur du potentiel et éventuellement du champ (sans pratiquement de temps de calcul supplémentaire) dont découlent les avantages suivants : tracé des équipotentielles aisé, idée générale de la répartition du potentiel et du champ, etc. et cela sans problème particulier à l'introduction de permittivités différentes.

Bien sûr, les méthodes de Monte Carlo et surtout de simulation de charges ont leurs domaines propres d'exploitation (voir [1] et [2]), notamment pour l'étude des gradients sur les conducteurs aériens de lignes H.T.

Par ailleurs, les méthodes E.F. et D.F. s'appliquent particulièrement bien à des domaines confinés tels ceux que l'on rencontre dans les postes blindés. (Notons que [2] donne la possibilité d'étendre ces méthodes à des espaces « infinis »).

r	Z	Résultats tirés de [I]						Nos résultats												
		M-C	S-C		E-F		D-F		E-F											
45	120	—	,26 E-1	,69 E-3	,10 E-1	—	—	,11 E-1	,11 E-1	,12 E-1	—	,59 E-1	,13 E-1	,17 E-1	,10 E-1	,55 E-1	1,2 E-1	,16 E-1	,17 E-1	,17 E-1
	150	—	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,78 E-2	—	,11 E-1	,11 E-1	,12 E-1	—	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1
	200	—	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	—	,11 E-1	,11 E-1	,12 E-1	—	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1
	230	—	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	—	,11 E-1	,11 E-1	,12 E-1	—	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1	,10 E-1
r	Z	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2

Chapitre électrique le long de EF (module)
(côté e' = I)

TABEAU 2.B

r	Z	Résultats tirés de [I]						Nos résultats												
		M-C	S-C		E-F		R-E		D-F		E-F									
45	120	,912	,873	,825	,908	,862	,88	,84	,907	,857	,906	,857	,857	,906	,857	,857	,857	,857	,857	,857
	130	,850	,863	,873	,869	,806	,85	,77	,872	,803	,869	,803	,803	,869	,803	,803	,803	,803	,803	,803
	140	,838	,838	,837	,828	,752	,81	,72	,852	,849	,837	,849	,849	,837	,849	,849	,849	,849	,849	,849
	145	,830	,829	,829	,828	,737	,8	,7	,831	,736	,828	,736	,736	,828	,736	,736	,736	,736	,736	,736
	150	,827	,823	,741	,823	,727	,8	,69	,825	,726	,726	,726	,726	,827	,726	,726	,726	,726	,726	,726
	160	,817	,817	,727	,818	,715	,79	,68	,82	,714	,816	,714	,714	,817	,714	,714	,714	,714	,714	,714
	170	,811	,815	,719	,814	,707	,79	,67	,818	,707	,814	,707	,707	,811	,707	,707	,707	,707	,707	,707
	180	,809	,814	,716	,812	,702	,79	,66	,817	,703	,813	,703	,703	,809	,703	,703	,703	,703	,703	,703
	190	,807	,814	,713	,812	,699	,79	,65	,817	,703	,813	,703	,703	,807	,703	,703	,703	,703	,703	,703
	200	,811	,814	,712	,813	,698	,79	,65	,817	,703	,813	,703	,703	,811	,703	,703	,703	,703	,703	,703
	210	,815	,814	,711	,813	,698	,79	,65	,817	,703	,813	,703	,703	,815	,703	,703	,703	,703	,703	,703
	220	,814	,814	,710	,812	,696	,79	,65	,817	,703	,813	,703	,703	,814	,703	,703	,703	,703	,703	,703
	230	,806	,814	,711	,814	,699	,79	,65	,817	,703	,813	,703	,703	,806	,703	,703	,703	,703	,703	,703
r	Z	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2

Potential le long de EF

TABEAU 2.A

r	Z	Résultats tirés de [I]						Nos résultats												
		M-C	S-C		E-F		D-F		E-F											
50	10	,56 E-2	,55 E-2	,71 E-2	,56 E-2	,72 E-2	,54 E-2	,57 E-2	,72 E-2	,54 E-2	,56 E-2	,54 E-2	,54 E-2	,72 E-2	,54 E-2	,56 E-2	,54 E-2	,54 E-2	,54 E-2	,54 E-2
	47,5	,72 E-2	,71 E-2	,73 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,74 E-2	,74 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2	,72 E-2
	97,5	,26 E-2	,21 E-2	,28 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1	,24 E-1
	123	,19 E-1	,16 E-1	,21 E-1	,18 E-1	,20 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,19 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,19 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,17 E-1	,17 E-1
	148	,0 E-1	,97 E-2	,81 E-2	,96 E-2	,79 E-2	,95 E-2	,95 E-2	,95 E-2	,79 E-2	,98 E-2	,79 E-2	,79 E-2	,95 E-2	,79 E-2	,98 E-2	,79 E-2	,79 E-2	,79 E-2	,79 E-2
	185	,95 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,91 E-2	,91 E-2	,91 E-2	,91 E-2	,91 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,95 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,93 E-2	,93 E-2
	223	,92 E-2	,92 E-2	,76 E-2	,76 E-2	,74 E-2	,74 E-2	,74 E-2	,74 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2	,75 E-2
r	Z	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2

Chapitre électrique le long de AB (module)

TABEAU 1.B

Quelques lignes de pente sont tracées et on peut s'apercevoir que la discrétisation est assez bonne

On distingue nettement la déformation des éléments finis. A titre d'illustration, nous allons reprendre sur une figure l'évolution de la « surface potentielle » en « relief » aux alentours du point E (fig. 6) (cas à un diélectrique où la pente devrait évoluer de manière continue), en liaison avec la fig. 5 et les tableaux 2.A et B. On distingue nettement la déformation des éléments finis.

C'est à cette fin (lissage de la courbe du potentiel) que l'on raffine la discrétisation dans les zones à forts gradients de potentiels qui sont détectables « à vue ». Aux frontières entre éléments !

$$\chi = \int \frac{1}{2} \epsilon E^2 dR$$

calcul, lors de la génération, on les place en général le degré est supérieur à 1). Or, pour faciliter le repérage des points désirés, et par conséquent, leur valeur du champ est plus correcte dans l'élément si même de sa dérivée, donc du champ électrique (la passage entre deux éléments, mais il n'en est pas de conditions, on peut démontrer la continuité de V au en fonction de la variable potentiel V. Sous ces (E = - grad. V représente le champ électrique) en l'absence de charges de volume et de surface)

La méthode des éléments finis mise en œuvre utilise une discrétisation de la variation élémentaire de la fonctionnelle :
 Si l'on s'intéresse au champ électrique, il faut d'abord savoir comment celui-ci est déterminé dans chacune des deux méthodes.

La méthode des éléments finis mise en œuvre utilise une discrétisation de la variation élémentaire de la fonctionnelle :

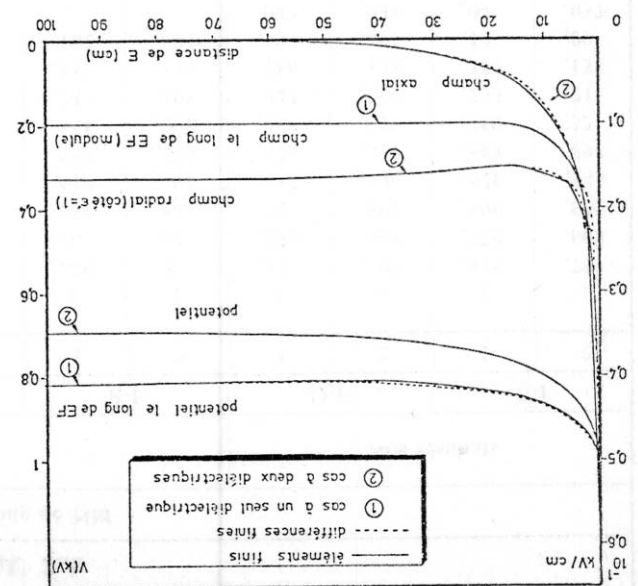


Fig. 5. potentiel le long de EF, champ radial (ε=1), champ le long de EF (module), champ axial. ① cas à un seul diélectrique, ② cas à deux diélectriques, - - - différences fines, — éléments fins.

La valeur du champ peut donc se calculer sans problème et fait intervenir les valeurs du potentiel en ce point et aux deux points voisins dans la direction désirée. En limitant volontairement les développements en série, on aboutit à une formule approximative du champ électrique. Le résultat peut

$$E_{0x} = f(V_0, V_1, V_2, h_1, h_2)$$

$$E_{1x} = f(V_0, V_1, V_2, h_1, h_2)$$

des formules du type :
 Le champ électrique étant relié au potentiel V par la formule $E = - grad. V$, il se calcule, en par la formule $E = - grad. V$, il se calcule, en différences finies, au moyen de discrétisations au second ordre de la dérivée du potentiel : on obtient

Néanmoins, il est clair, d'après la figure, que dans des situations similaires, la « bonne » valeur du champ sera obtenue dans l'élément de « coin ».

1) dans l'élément 61, le champ radial est nul puisque le potentiel est imposé sur l'électrode et donc que la pente est nulle dans cette direction, alors que la valeur de champ ne peut être nulle en E (voir élément 80) ;

2) de même dans l'élément 81, pour le champ axial cette fois ;

3) tandis que l'élément 80 reprend pratiquement les deux composantes, à la continuité près qui est impossible en un angle vif tout comme un angle vif est impossible à réaliser en toute rigueur.

puisque la continuité de cette dernière est pratiquement assurée sauf aux proches alentours du point E en passant successivement de l'élément 61 à 80 puis à 81. La distorsion de ces 3 éléments est clairement mise en évidence sur la fig. 6, et l'on peut constater de suite, au point E :

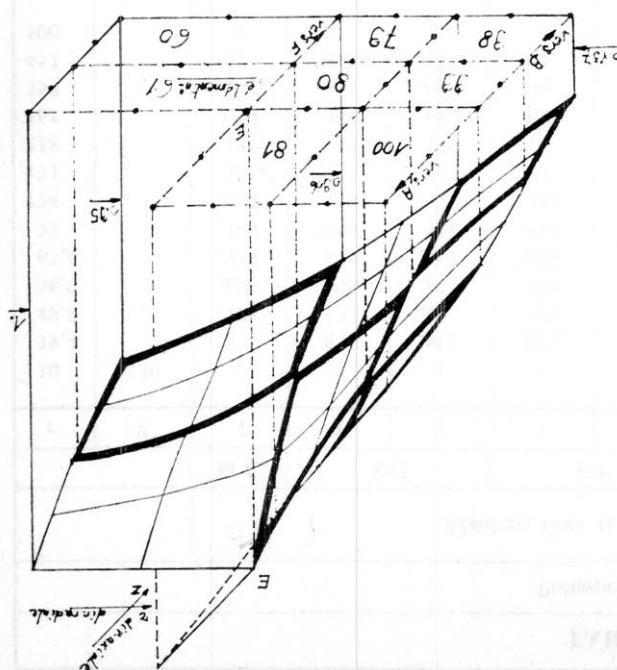


Fig. 6. La distorsion de ces 3 éléments est clairement mise en évidence sur la fig. 6, et l'on peut constater de suite, au point E :

quent des structures géométriques bien définies (espace confiné), tant la méthode des E.F. que la méthode des D.F. y trouvent « naturellement » un domaine d'application préférentiel.

Les programmes développés et actuellement opérationnels à l'Institut d'Electricité Montefiore (U.Lg.) ont été utilisés avec succès dans la recherche du potentiel et des intensités du champ électrique dans le cas de câbles à isolation gazeuse (isolateurs), transformateur de potentiel et transformateur de courant, bornes de traversée, etc.

Grâce aux performances actuelles des calculateurs numériques, les résultats obtenus du point de vue quantification de la contrainte diélectrique des isolants conduisent à améliorer le matériel et à augmenter sa fiabilité grâce à une utilisation toujours plus rationnelle des matériaux mis en œuvre.

REFERENCES

- [1] BEASLEY, PICKLES, d'AMICO, BERETTA, FANELLI, GIUSEPPETTI, di MONACO, GALLET, GREGOIRE et MORIN. *Comparative Study of Three Methods for Computing Electric Fields*. Proc. IEE, Vol. 126, n° 1 - January 1979 - pp. 126 à 134.
- [2] J. DEUZE, J.L. LILJEN, L. VANDERMEEREN. *Les méthodes de calcul numérique des champs électriques. Leurs possibilités et leurs limitations*. Revue A.I.M. - Janvier 1978 - pp. 203 à 212.
- [3] K.H. HUEBNER. *The Finite Element Method for Engineers*. Edité chez John Wiley & Sons - London.
- [4] J. DEUZE. *Détermination de la distribution du champ électrostatique dans les installations à haute tension*. Thèse de Doctorat - Institut d'Electricité Montefiore 1976.
- [5] L. VANDERMEEREN. *Recherche des contraintes diélectriques dans les câbles à isolation gazeuse par voie numérique*. Thèse de Doctorat - Institut d'Electricité Montefiore 1977.
- [6] J.L. LILJEN. *Application de la méthode des éléments finis au calcul de la répartition du champ magnétique dans un turbo-alternateur*. Travail de fin d'études - Institut d'Electricité Montefiore 1976.

être amélioré en choisissant des mailles très fines aux alentours des zones à champ élevé.

Après cette discussion sur la sensibilité des méthodes, il ne faut pas oublier que le cas que nous traitons est théorique puisque le champ électrique est théoriquement infini à un angle vif et qu'en pratique, il est limité par le rayon de courbure réel en cet endroit. Donc la valeur que nous obtenons ici n'est pas significative. Toutefois, ce phénomène est particulièrement local et le rayon de courbure réel n'a plus d'influence dès que l'on s'écarte un peu de l'angle. Il y a simplement modification de l'allure de la courbe du champ électrique de manière à ce que l'intégrale du champ sur la zone d'influence du coin reste constante.

3. Conclusions

A la comparaison des résultats, il apparaît que les deux méthodes de calcul sont équivalentes.

La méthode des différences finies est simple d'exploitation, nécessite peu de temps de préparation de données et ne pose pas de problème quant aux valeurs du champ électrique dans les zones à forte variation près des électrodes, une fois que l'on sait l'approximation que l'on fait pour le calcul. Elle préfère des structures à caractère rectiligne, de préférence orthogonal et si possible en espace confiné, bien que ces limitations peuvent être surpassées, en perdant un peu de la simplicité de la mise en œuvre.

La méthode des éléments finis entraîne un programme de plus grande ampleur et nécessite souvent un programme de génération des données. Il faut être prudent dans l'interprétation des valeurs du champ électrique qui n'est pas constant à la frontière entre deux éléments, et particulièrement dans les zones à forte variation du potentiel. Mais elle est applicable à n'importe quel type de problème, à espace confiné de préférence (avec la même remarque que ci-dessus), notamment le respect des surfaces courbes par des éléments de degré deux ou supérieur, les possibilités tridimensionnelles et non-linéaires. De toute façon, elle est très simple d'exploitation dans les cas cités pour les D.F. puisque les maillages quadrangulaires sont générés aisément. Il faudrait cependant mettre au point un programme d'interprétation des résultats.

Dans le cadre des problèmes qui se posent aux constructeurs d'appareillage blindés et qui impli-

