

EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES DUS AUX COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES POSTES H.T. *

PAR

C. DESTOQUAY (1)
M. GERADIN (2)
J.L. LIJEN (3)

INTRODUCTION

Le développement accéléré du programme de l'industrie de production de l'énergie électrique au cours de ces dernières années a entraîné une augmentation prévisible importante des courants de court-circuit susceptibles d'apparaître sur les ouvrages du réseau de transport à H.T., en particulier dans les postes.

La construction de postes capables de supporter les courants de court-circuit pouvant aller jusqu'à 40 kA (en Belgique) et au-delà (jusqu'à 100 kA pour les postes blindés 525 kV) pose des problèmes technologiques nouveaux, par suite des efforts électrodynamiques importants qu'ont à supporter les conducteurs et les charpentes.

D'où la nécessité de modèles mathématiques permettant de prévoir les contraintes mécaniques susceptibles d'apparaître.

Selon que l'on considère des faisceaux de conducteurs rigides ou flexibles, les modèles mathématiques que l'on peut mettre en œuvre pour décrire le comportement dynamique de telles structures sont assez différents. Dans le cas de conducteurs rigides, le mode de fixation sur les supports et l'espacement sont tels que l'on peut en général admettre que les déplacements résultant du défaut restent linéaires et que la répartition des forces électrodynamiques n'est pas altérée par la déformation, alors que les connexions tendues accusent un comportement fortement non-linéaire.

Le présent article est limité au cas des connexions rigides : on y montre comment l'on peut réaliser le calcul des contraintes dynamiques dans les conducteurs en tubes et leurs suspensions par une méthode d'éléments finis. L'accent est mis sur les difficultés

(1) Ingénieur Civil Electromécanicien — Promotion 1978.
(2) Chercheur qualifié du FNRS — LTAS, Université de Liège.
(3) Assistant Transport et Distribution de l'Énergie Electrique, Institut d'Electricité Montefiore, Université de Liège.
* Manuscrit reçu le 28 juin 1978.

de modélisation que l'on peut rencontrer : représentation des conducteurs rigides et le choix du maillage en éléments finis.

Les deux exemples traités sont accompagnés d'une confirmation expérimentale des résultats obtenus. Ils sont bien représentatifs des difficultés que l'on peut rencontrer dans l'étude de configurations de postes existantes.

1. Définition de la force d'excitation

Dans le cadre des hypothèses habituellement admises pour des configurations de postes à haute tension où les jeux de barres sont suffisamment longs et le rapport entre le diamètre des tubes et leur écartement suffisamment faible, le module de la force d'origine électromagnétique qui s'exerce par unité de longueur entre deux conducteurs parcourus par des courants i_1 et i_2 est donné par la relation déduite de la loi de Biot-Savart

$$f = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_1 i_2}{r_{12}^2} \quad (1)$$

μ_0 est la perméabilité de l'air, et d la distance séparant les conducteurs. Cette force est attractive pour des courants de même signe et répulsive sinon.

Si on suppose négligeable la variation de d dans le temps, la force ne varie temporellement qu'avec l'intensité des courants.

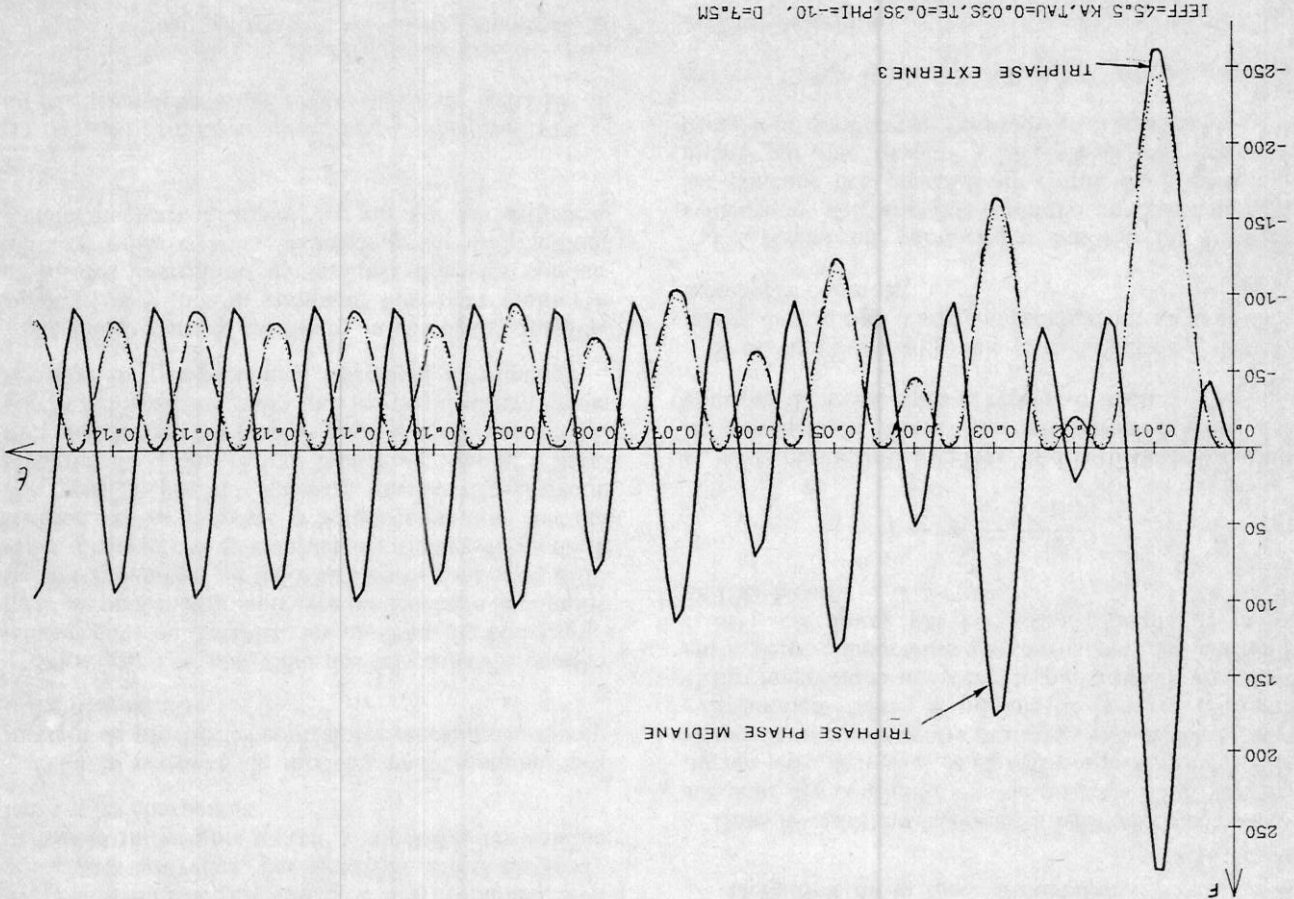
Le réseau en court-circuit biphasé ou triphasé symétrique pouvant être assimilé indépendamment sur chacune des phases à un circuit R, L série alimenté par une tension $\sqrt{2}E_{eff} \sin(\omega t + \alpha)$, les courants sont donnés par l'expression classique: [1]

$$i(t) = \sqrt{2} I_{eff} \{ \sin(\omega t + \phi) - e^{-t/\tau} \sin \phi \} \quad (2)$$

avec les définitions

$$I = E_{eff}/Z, Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (3)$$

Fig. 1. — Forces d'excitation pour un court-circuit biphasé (pointillés) et pour un triphasé au même endroit du réseau.



Dans un cas triphasé, on le trouve maximal sur chacune des phases successivement pour les valeurs suivantes de l'angle ϕ : [2]

phase 1, ou phase de référence $\phi \approx 80^\circ$ et 260°

phase 2 (phase centrale) $\phi \approx 10^\circ, 80^\circ, 170^\circ$ et 260°

phase 3 $\phi \approx 10^\circ$ et 170°

On peut montrer que dans un cas biphasé, le facteur d'asymétrie que l'on définit comme étant le rapport entre la valeur de crête maximale du courant de court-circuit et la valeur maximale de sa composante sinusoidale, sera le plus grand pour $\phi \approx -\frac{2}{\pi}$.

— court-circuit triphasé (sans terre)

$$i_1 = i(t, \phi); i_2 = i(t, \phi - \frac{2\pi}{3}); i_3 = i(t, \phi + \frac{2\pi}{3}).$$

— court-circuit biphasé (sans terre)

$$i_1 = -i_2 = i(t, \phi);$$

Dans les deux cas envisagés :

$$\text{et } \phi = \alpha - \theta \text{ où } \theta = \text{arctg } \omega\tau. \tag{4}$$

Considérons les cas particuliers suivants qui admettent une représentation analytique simple :

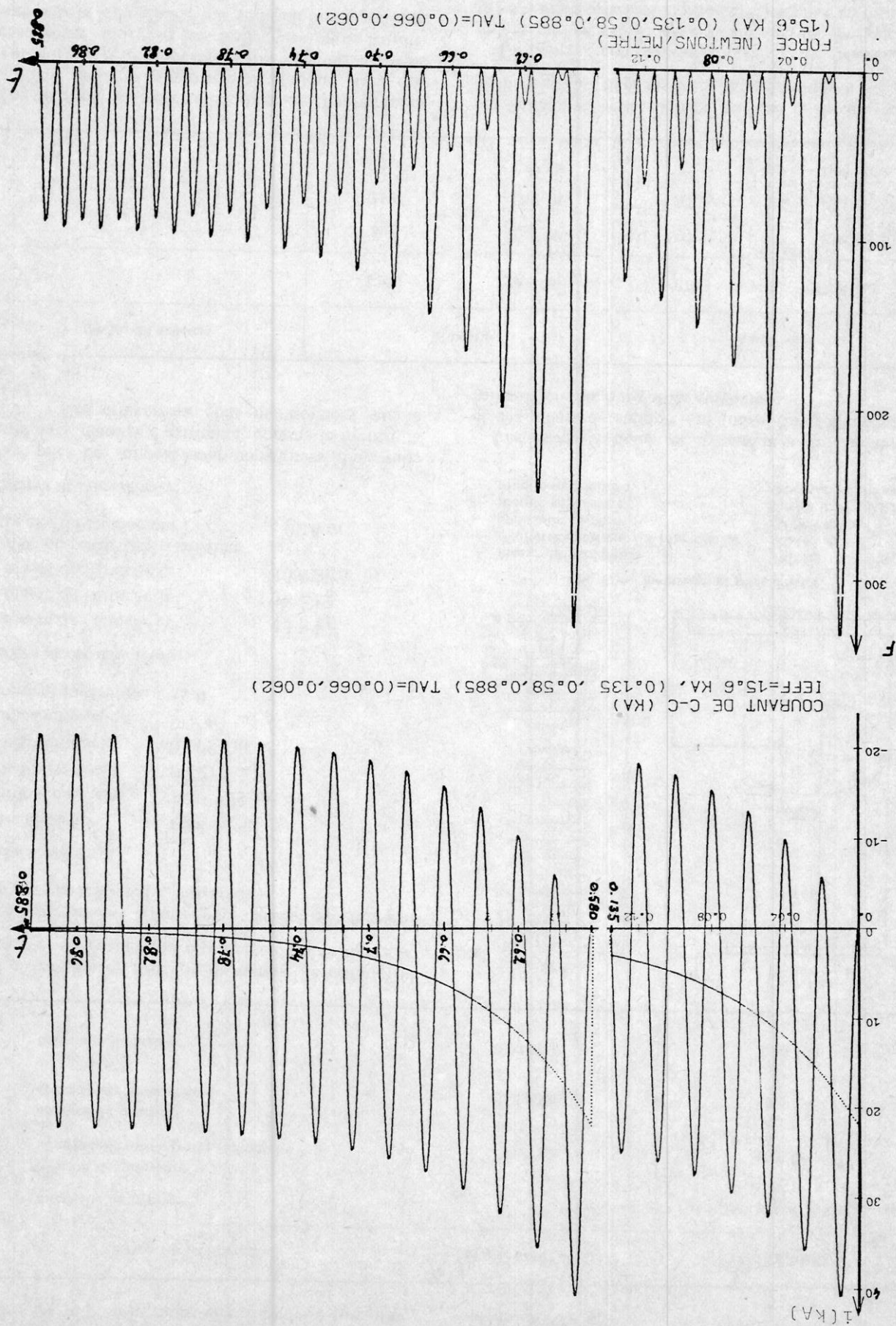
2. Résonance mécanique

- L'allure des cas a et b est assez semblable : la force contient une composante continue permanente qui la rend unidirectionnelle. Le cas c se distingue par une allure plus harmonique : la force correspondante ne contient aucune composante continue.
- 1) $F_{bi}^{max} = 246 \text{ N/m}$ cas a,
 - 2) $F_{tri}^{max} = 265 \text{ N/m}$ cas b,
 - 3) $F_{tri}^{median\ max} = 280 \text{ N/m}$ cas c.

La figure 1 montre le tracé des forces dans un cas précis : en traits épais et interrompus, la phase centrale et la phase 3 lors d'un court-circuit triphasé, et en traits pointillés le défaut biphasé au même endroit du réseau. Tous les maxima apparaissent au temps $t \approx 0.01 \text{ s}$, et se classent comme suit :

Notons que ces maxima sont très plats, puisqu'ils s'étalent sur environ $\pm 5^\circ$.

Fig. 4. — Structure D : Tracé du courant de la force d'excitation.



On note que les trois piliers, bien qu'apparemment identiques, ont un comportement statique assez différent qui ne peut s'expliquer que par un mauvais encastrement. L'accord des fréquences entre les différents piliers a été réalisé par addition de masselotes.

La figure 6 montre les 21 premiers modes propres de la structure. On observe que la structure est montée

sur isolateurs assez souples, puisque la flexion de la suspension est déjà marquée dans le mode à 6,1 Hz. La figure 7 compare les contraintes de flexion calculées par superposition modale sur une période de 0,1 s à celles relevées expérimentalement : en tous les points de mesure envisagés, la corrélation s'avère excellente, puisque l'écart reste pratiquement toujours

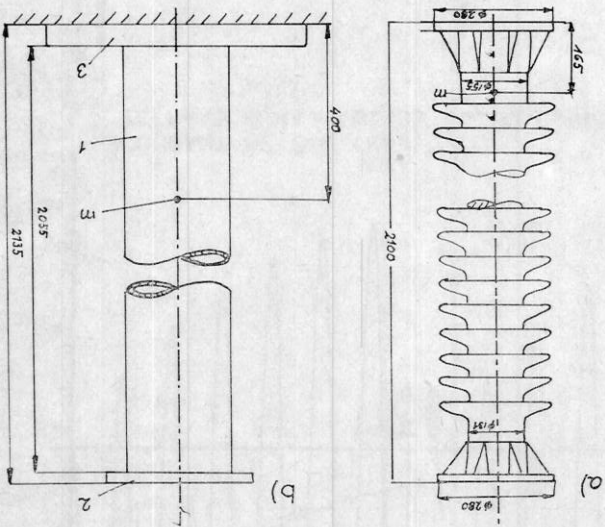
numéro du support	isolateur			pilier d'acier
	f(Hz)	K(N/m)	f(Hz)	
1	21,5	7,3 · 10 ⁶	27,2	1,46 · 10 ⁶
2	21,5	7,57 · 10 ⁶	27,2	1,77 · 10 ⁶
3	21,5	7,77 · 10 ⁶	27,2	1,88 · 10 ⁶

Les piles de support sont constituées d'un tube central avec plaques d'extrémité, comme le montre la figure 5. Les dimensions sont mentionnées sur la

Les essais statiques et dynamiques des isolateurs et des piliers de support ont fourni les fréquences et raideurs en tête d'isolateur suivantes :

- masse des isolateurs : 180 kg
- diamètre extérieur du tube d'acier : 0,2445 m
- épaisseur de paroi : 0,0063 m
- plaque supérieure : 0,44 × 0,34 × 0,03 m
- plaque inférieure : 0,6 × 0,6 × 0,05 m

Fig. 5. — Isolateurs et piles d'acier.



- masse de l'attache A : 13,8 kg
 - masse de l'attache B : 18,2 kg
 - masse de l'attache C : 13,8 kg
 - distance entre tête d'isolateur et axe du conducteur : 0,16 m
- attaches des conducteurs*
- masse répartie : 6,04 kg/m
 - module d'élasticité : 7,10¹⁰ N/m
 - diamètre extérieur : 0,1211 m
 - diamètre intérieur : 0,1087 m
 - distance entre cond. : 1 m
 - décrement logarithm. : ≈ 0

La structure est d'autre part caractérisée mécaniquement par les données suivantes :

Il en résulte, en fonction du temps, l'évolution du courant et de l'excitation représentée par la figure 4.

valeurs caractéristiques	premier court-circuit		renclenchement
	intervalle de temps	courant de court-circuit	
intervalle de temps	0 < t < 0,135 s	41,0 kA	0,580 < t < 0,885 s
composante asymétrique maximale		41,0 kA	40,8 kA
composante harmonique		15,6 kA	15,6 kA
constante de temps $\frac{L}{R}$	0,066 s		0,062 s

Le défaut examiné consiste en un premier court-circuit biphasé suivi d'un renclenchement, et est caractérisé par les valeurs suivantes :

Fig. 6. — Modes propres de la structure D.

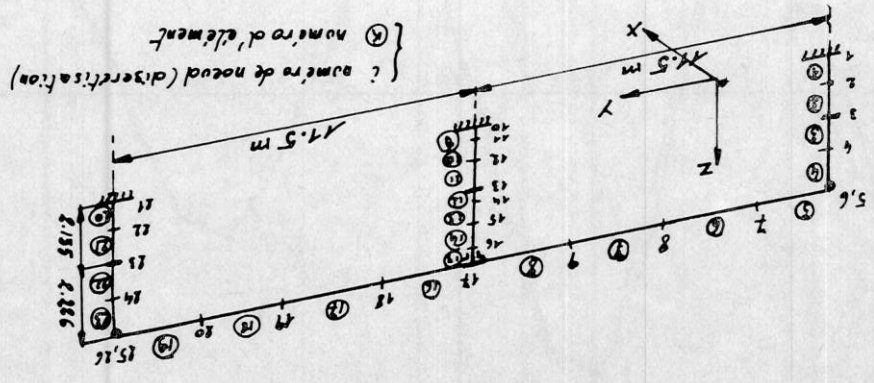
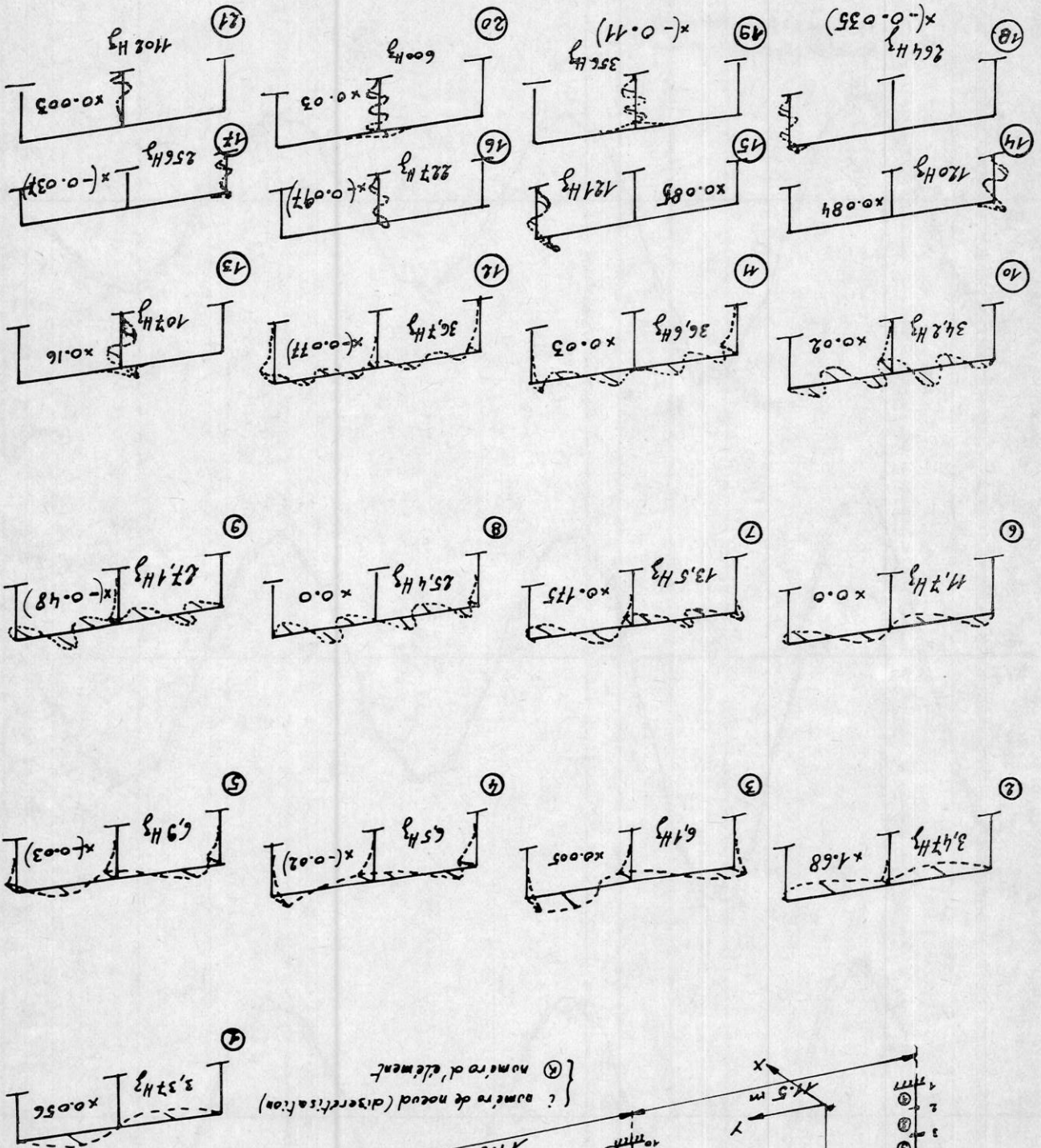
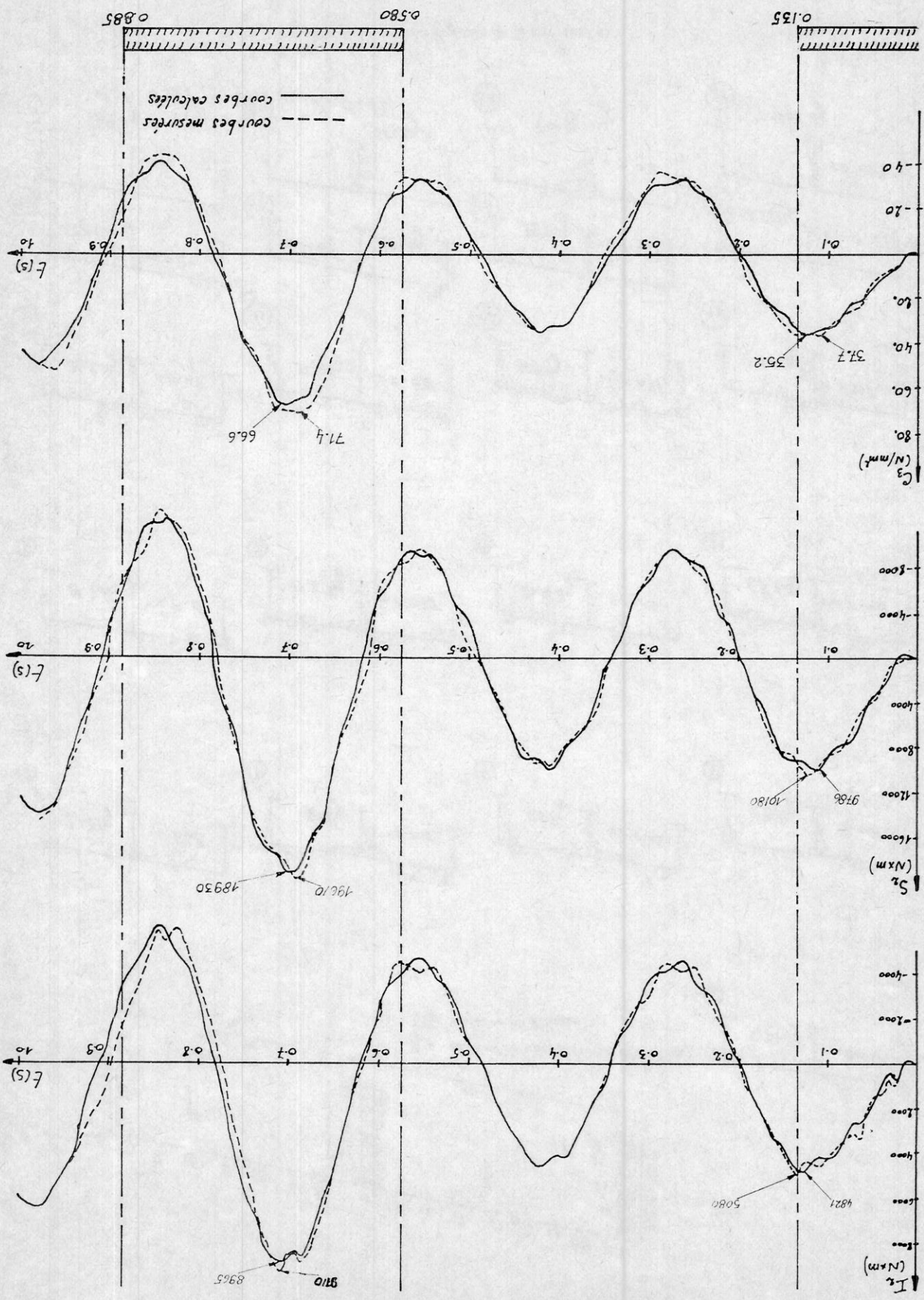


Fig. 7. — Structure D. Contraintes Flexion.



une très bonne concordance entre les deux analyses, qui fournissent une contrainte maximale 17 % plus élevée que celle mesurée.

La figure 13 montre l'évolution du moment de flexion à la base de l'isolateur central. On est surpris dans ce cas d'observer que si, dans les deux analyses, le moment fléchissant oscille autour d'une même valeur moyenne, la discrétisation la plus grossière donne lieu à une pointe de tension qui n'est pas confirmée par l'expérience. Le fait d'inclure dans le modèle les fréquences plus élevées des barres a pour conséquence d'amortir la réponse des isolateurs selon la courbe pointillée. Cette fois, la comparaison avec l'expérience est très satisfaisante.

Sur le plan des contraintes dans les barres l'écart de la valeur nominale par rapport à la valeur maximale ne peut s'expliquer aisément.

En effet, nous avons testé une nouvelle discrétisation, en raffinant la discrétisation totale et testant des raccords moins rigides que les isolateurs. Les contraintes restent aux alentours de 75 MN/m². Sans doute l'enchaînement des barres dans les raccords n'est-il pas assimilable à un encastrement. Le manque de données supplémentaires à ce sujet nous empêche d'affiner le modèle. On remarquera dans le tableau de la figure 14 les valeurs obtenues lors de calculs demandés par la CIGRE et publiés en 1976. Notre analyse apparaît donc comme fiable.

inférieur à 4 %. Seul l'écart observé à la base de l'isolateur central (12) atteint 8 %, avec un déphasage plus marqué entre les réponses calculées et mesurées : ce fait peut s'expliquer par la caractérisation imparfaite des isolateurs au point de vue structural.

4.b. CAS DE LA STRUCTURE A.

L'autre structure analysée, dénommée structure A dans les rapports CIGRE, est représentée par la figure 8. La même figure donne ses caractéristiques mécaniques, de même que celles du défaut envisagé. Il en résulte les courants de court-circuit et force électrodynamique représentés par la figure 9.

On a procédé à une première discrétisation par éléments finis qui a conduit au schéma modal de la figure 10, sur lequel on détecte la présence de deux modes symétriques aux alentours de 50 Hz.

On a ensuite procédé à une discrétisation plus fine des barres, qui montre (figure 11) que la résonance des oscillateurs est en fait accompagnée d'une vibration des barres avec un nombre d'ondes élevé. D'où la nécessité d'un maillage suffisamment fin des jeux de barres pour prendre en compte ce couplage qui, comme le montrent les résultats du calcul, amortit dynamiquement la résonance des isolateurs. La figure 12 montre les contraintes dans les barres obtenues à partir des deux discrétisations. Il en résulte

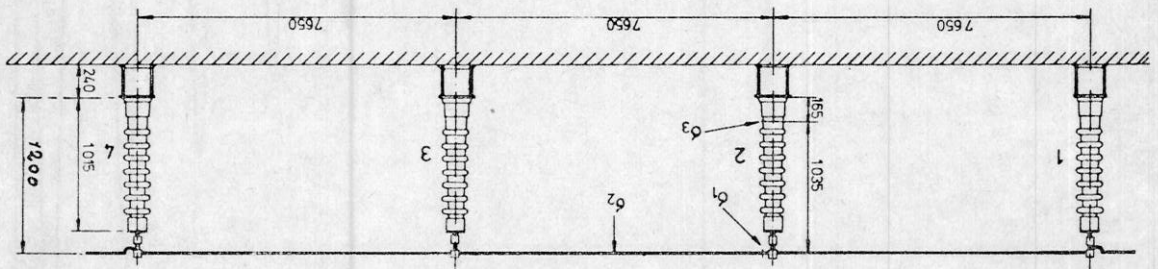


Fig. 8. — Structure A.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: tensions mesurées.

Conducteur tubulaire (Aluminium)	Masse	1,06 kg/m	Pièce de jonction (Acier)	Masse	1,6 kg	
Diamètre extérieur	30 mm	Module d'Young	$7,10^{10}$ N/mm ²	Isolateurs-suppôts 1 à 4 (Stéatite)	Masse	47,6 kg
Diamètre intérieur	20 mm	Amortissement-Dé-crement log.	0,017	Fréquence naturelle	58,9 Hz	
Amortissement-Dé-crement log.	0,036	Amortissement-Dé-crement log.	0,036	Coefficient d'élasticité	1960 N/mm	

Le conducteur est fixé rigidement à chaque point.
 Entraxe des barres 1 m
 Raccord du conducteur (Aluminium) Masse 1,4 kg
 Courant de court-circuit I crête = 20 kA
 I eff. = 7,5 kA
 Durée de court-circuit 0,3 s
 Constante de temps du circuit (L/R) 0,095 s

Fig. 9. — Structure A. Courant de court-circuit et force d'excitation.

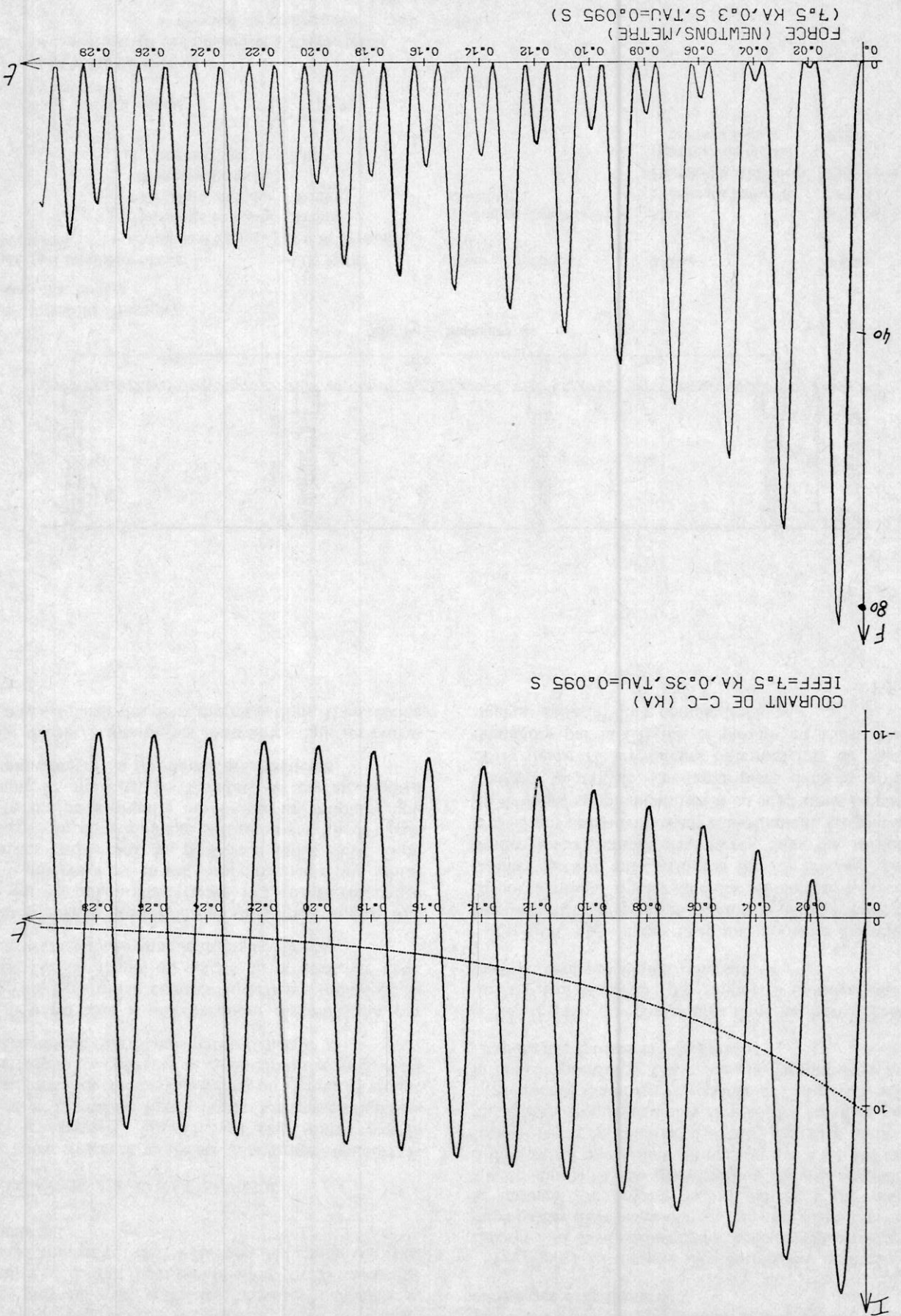
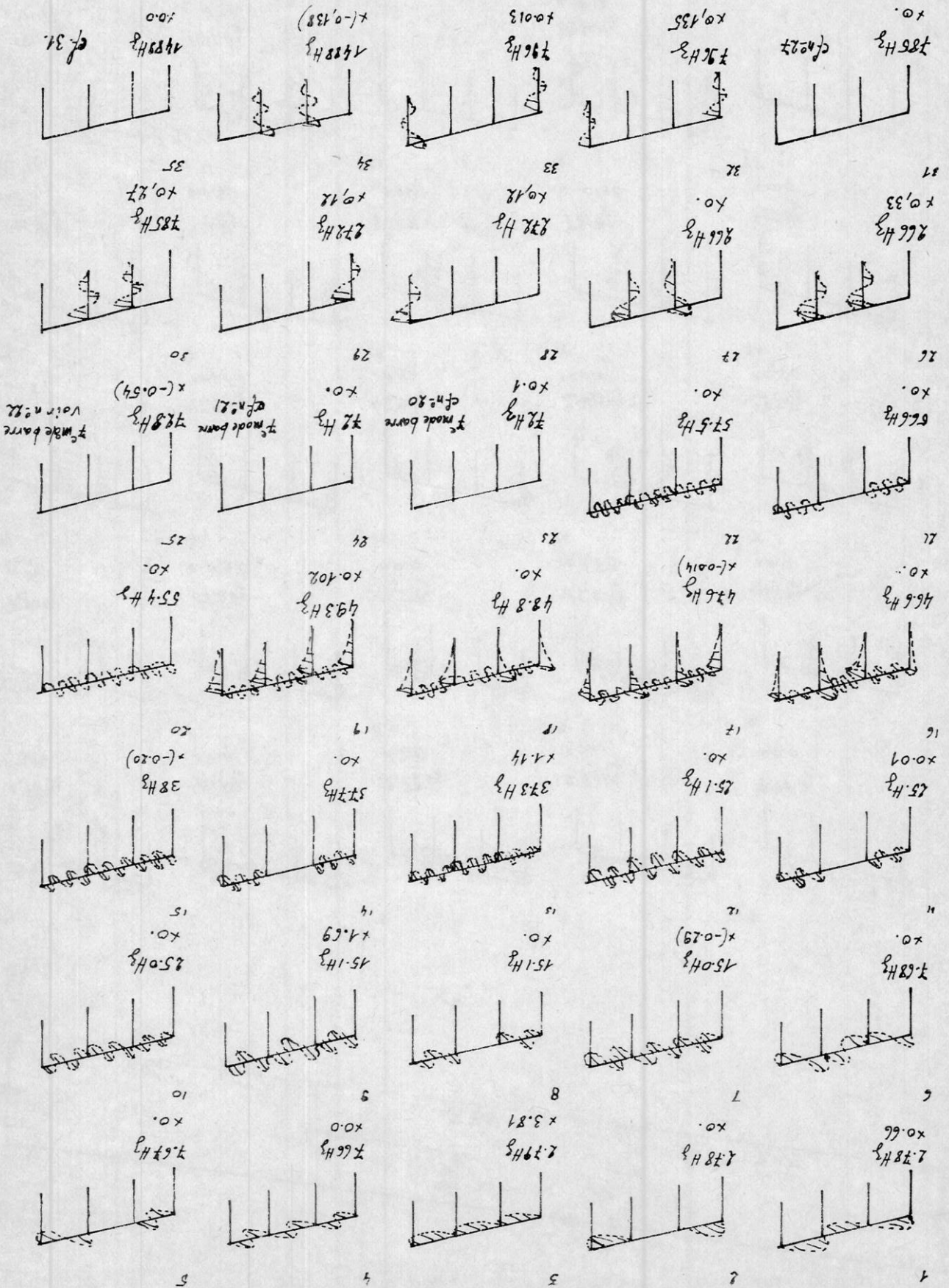
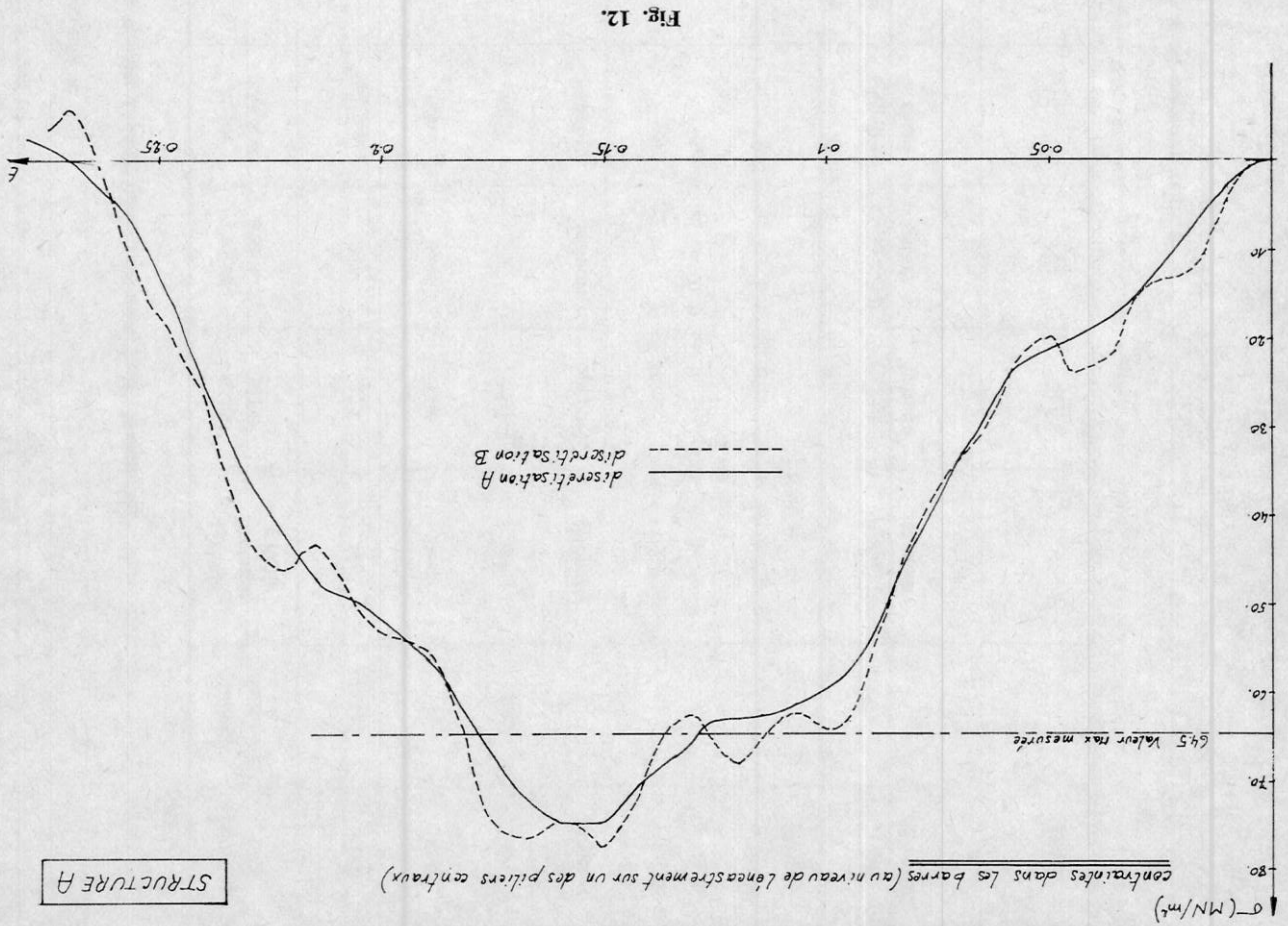
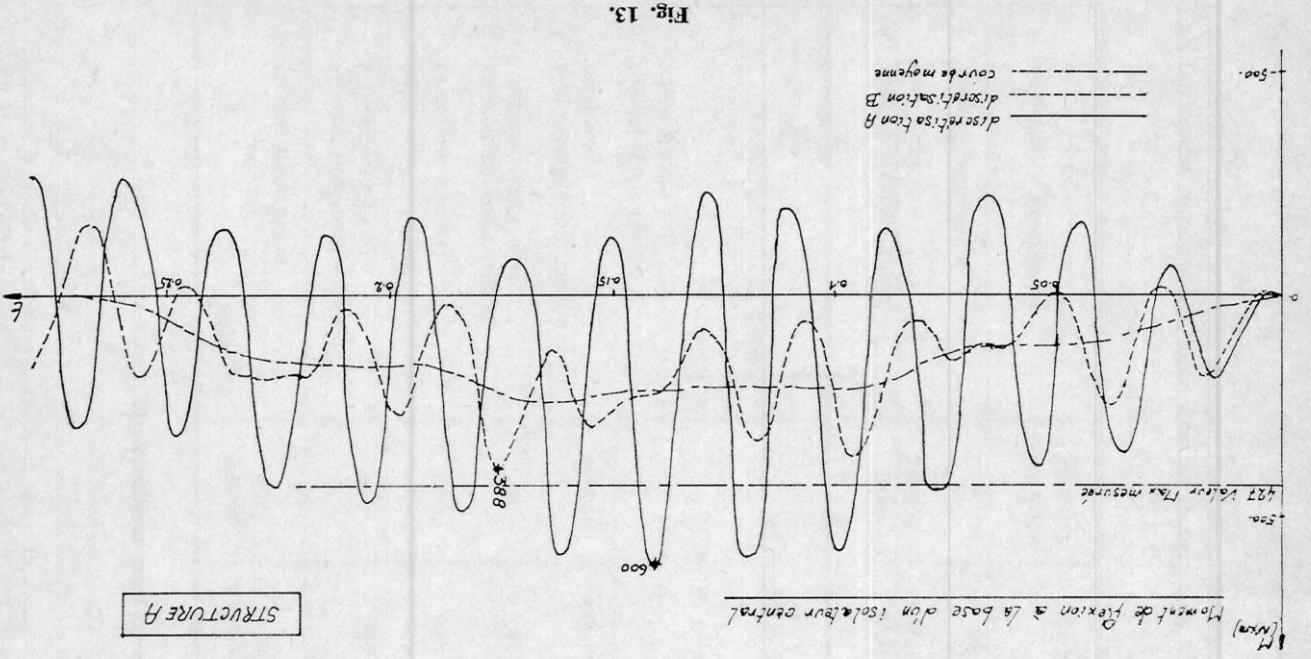


Fig. 11. — Structure A. 2^o discretisation.





- [1] A. CALVAER. — *Electricité théorique*. — Fascicule 1. — Editions Derouaux. — Liège 1971 pages V.33 à V.35.
- [2] *Efforts électrodynamiques dans les postes haute tension*. Travail de Fin d'Etudes de C. Destoquay. Université de Liège 1978.
- [3] SAMCEF, *Système d'analyse des milieux continus par éléments finis*. Manuels Théorique et d'Utilisation édités par le LTAS (Laboratoire de Techniques Aéronautiques et Spatiales de l'Université de Liège).
- [4] J.L. LILLEN. *Efforts électrodynamiques dans les postes H.T. avec jeu de barres rigides*. Modélisation et comparaison de la mesure et du calcul. Note interne D/1978/0480/10 mai 1978.
- [5] G. PALANTE. *Comportement de conducteurs rigides et de leurs supports dans les conditions de court-circuit. Comparaison entre valeurs calculées et mesurées*. CIGRE 1976. Rapport 23-10.
- [6] G. HOSEMANN and D. TSANAKAS. *Calculated and Measured Values of Dynamic Short-circuit Stress in a High Voltage Test Structure with and without Reclosure*. Rapport CIGRE 23-77 (WGO2)03-IWD April 1977.
- [7] G.SANDER, M. GERADIN, C. NYSSSEN, M. HOGGE, *Accuracy Versus Computational Efficiency in Nonlinear Dynamics*. Int. Conf. FE-NOMECH 78, Stuttgart, 30 août-1^{er} septembre 1978 (à paraître).

REFERENCES

- la possibilité de couplage entre modes fortement excités,
- De plus, le court-circuit sera toujours envisagé de telle sorte que :
- l'asymétrie soit maximale;
- il soit triphasé symétrique, auquel cas c'est la phase extérieure la plus sollicitée.
- L'expertimentateur averti pourra, en fonction de ces différents paramètres, définir le cas de sollicitation maximale.
- Enfin, notons que l'étude présente ne couvre que le cas des postes à conducteurs rigides : la possibilité de calculer les mêmes efforts dans un poste à conducteurs souples suppose que l'on prenne en compte les grands déplacements que subissent les conducteurs et la modification des forces qui en résultent.
- Un tel logiciel de calcul est actuellement en cours de développement et sera intégré dans le programme de calcul des structures par éléments finis SAMCEF développé par le LTAS* de l'Université de Liège.
- [7].
- * Laboratoire de Techniques Aéronautiques et Spatiales.
- La méthode des E.F. permet de traiter le problème abordé avec un certain automatisme et fournit des résultats fiables, comme on peut le constater dans les cas traités. La modélisation de la structure en éléments finis pourra s'effectuer sur les bases énumérées plus haut.
- Dans un cas donné, se pose également le problème fondamental de définir quelle est l'excitation qui conduira aux contraintes maximales : peuvent en effet varier le type de court-circuit observé, sa durée et la présence éventuelle d'un réenclenchement sur défaut. On peut le faire sur base de la connaissance que l'on acquiert de la structure lors de l'analyse modale.
- Entrent en ligne de compte,
- la présence éventuelle de fréquences propres autour de 50 et 100 Hz,
- la fréquence du mode symétrique fondamental du jeu de barres, dont dépendent la durée du défaut le plus défavorable ainsi que l'instant de réenclenchement sur défaut.

CONCLUSIONS

