

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

avec les définitions

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

Le réseau en circuit-biphasé ou triphasé symétrique pouvant être assimilé indépendamment sur chaque des phases à un circuit R, L série alimenté par une tension $\sqrt{2}E_0 \sin(\omega t + \alpha)$, les courants sortant des bornes par rapport à l'expression donnée [1] sont

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

qui est la perméabilité de l'air, et d'un diamètre séparant courants de même signe et repulsifs si non.

$$(1) \quad \frac{d}{I_1 I_2} - \frac{2\pi}{I_1^0} = J$$

Dans le cadre des hypothèses habituelles 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 électrique deux conducteurs parcourus par une unité de longueur, et l'énergie dissipée par la relation déduite de la loi de Biot-Savart

1. Définition de la force d'excitation

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.

de modélisation que l'on peut reconstruire ; représentation des isolateurs et systèmes de leurs paramètres élastiques, masses et géométries, représentation des conducteurs et le choix du maillage éléments finis.

(3) NEIL LILL

M. GERARDIN (2)

C. DESKTOP UAY (1)

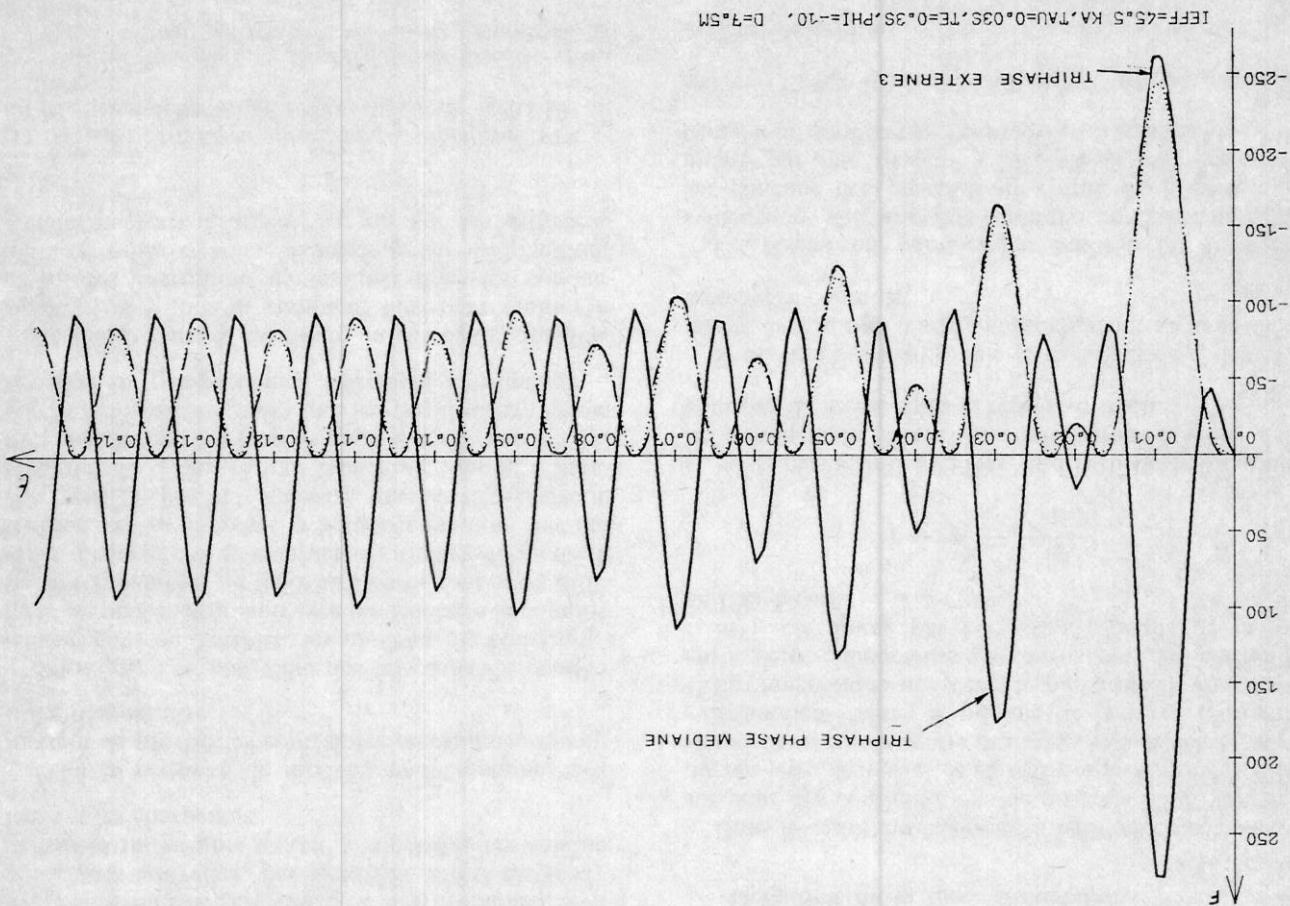
PAR

DANS LES POSTES H.T.*

DUS AUX COURANTS DE COURT-CIRCUIT

EFFECTS ELECTRODYNAMIQUES

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



$$\begin{aligned}
 & \text{— default biphasé } \phi = -\frac{\pi}{2} \\
 & I_{bi} = \frac{1.6 I^2}{d} \times \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{4} \cos 2wt - e^{-t/\tau} \cos wt + \frac{1}{2} e^{-2t/\tau} \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

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

2. Résonance mécanique

L'allure des cas à et b est assez semblable : la force contenue dans une composition continue. La force plus harmonique : la force correspondante ne rend pas directement continue. Le cas c se distingue par une allure plus harmonique que le cas b.

$$3) F_{tri \text{ median max}} = 280 \text{ N/m cas c.}$$

$$2) F_{tri \text{ max}} = 265 \text{ N/m cas b,}$$

$$1) F_{bi \text{ max}} = 246 \text{ N/m cas a,}$$

≈ 0.01 s, et se classent comme suit :

La figure 1 montre le trace des forces dans un cas précis : en traits épais et interrompus, la phase centrale de la traîne pointillée le default biphasé au même endroit du réseau. Tous les maxima apparaissent au temps t

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

Dans les deux cas envisagés : Il = $i(t, \phi)$; $i_2 = i(t, \phi - \frac{3\pi}{2})$; $i_3 = i(t, \phi + \frac{3\pi}{2})$. 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 circuit et la valeur maximum de sa composante sinusoïdale, sera le plus grand pour $\phi \approx -\frac{\pi}{2}$. Dans un cas triphasé, on le trouve maximal sur chaque phase 3 danses phases successives 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°

Il = $-i_2 = i(t, \phi)$; — court-circuit triphasé (sans terre)

$$\text{et } \phi = \alpha - \theta \text{ où } \theta = \arctg \omega t. \quad (4)$$

Il oligogénélement du default par rapport à un groupe génératuer,

de quelques dizaines à quelques centaines de ms selon de quelques dizaines à quelques centaines de ms selon le groupe génératuer,

la constante de temps vise du default, qui vaut

$f(t)$ la matrice-colonne des forces extérieures, σ structure,

- C La matrice des amortissements.
- x La matrice-colonne des degrés de liberté de la discrétilisation. Ses composantes sont des dépla- cements et des rotations en certains points de la structure.

$$(L) \quad kx + cx + Mx = f(t)$$

Nous ne rentrons pas dans le détail de la modélisation du problème. Rappelons simplement que les structures formées par les deux éléments supports sont discrètes par un ensemble d'éléments fins de portée de ceux-ci qui modélisent numériquement la forme d'un système d'équations différentielles linéaires à coefficients constants du second ordre admises à définir : l'assemblage de ceux-ci fournit un modèle numérique discréte de la structure étudiée qui permet la forme d'un système d'équations différentielles à coefficients constants du second ordre.

L'étude a été réalisée en utilisant le logiciel SAMCEF de calcul des structures par éléments finis développé par le Laboratoire d'Aéronautique de l'Université de Liège [3].

3. Modélisation

At the end of the resonance on modulation in the case of each central element of the distribution of masses by mass fractions which are far from the center of the system, the effect of the presence of the central element on the properties of the system is negligible.

La résonance éventuelle d'un mode propre dont la fréquence avoisine 50 ou 100 Hz est d'autant plus dangereuse que son ordre est faible, car la participation d'un mode à la force d'excitation décroît avec son nombre d'ondes. Des lors, la résonance la plus dangereuse est celle des isolateurs, surtout pour les postes BT et MT où la longueur de ceux-ci est faible, et par conséquent, leur fréquence propre fondamentale élève le cas de la structure A).

En ce qui concerne le premier mode propre de chaque constituant, on observe des fréquences proches de l'ordre de quelques Hz pour les barres, mais la fondamentale peut atteindre quelques dizaines de Hz pour les isolateurs.

Les fréquences naturelles d'une poutre dont les conditions aux limites sont bien spécifiées sont proportionnelles au facteur $\sqrt{\frac{EI}{ml^4}}$ où EI représente la rigidité flexionnelle de la poutre, m, sa masse constante de proportionnalité est fonction des conditions aux limites et de l'ordre du mode considéré par unité de longueur, et l, sa longueur. La répartition de proportionnalité est l, sa longueur.

Afin d'éviter ces plages de fréquences, il convient de commettre l'ordre de grandeur des fréquences proposées des divers éléments constitutifs du jeu de barres.

Le mode de construction actuel des jeans de barres est tel que leur première fréquence propre reste inférieure à 10 Hz : elle vaut en général de 3 à 5 Hz. Des trous, le premier maximum des concentrations apparaît après environ 10 cycles de la force appliquée (≈ 0.1 s), ce qui justifie le fait d'observer des commentaires moindres dans le cas typique sur la phase transitoire de la première résonance dans le circuit électrique que la grande majorité des constructeurs recommande.

Il convient donc de détecter les fréquences propres de la structure et d'éviter les plages fréquentielles dans lesquelles que nous situons entre 45 et 50 Hz ainsi qu'entre 99 et 101 Hz, la resonance à 50 Hz étant la plus dangereuse vu le terme en cos qui au début de l'apparition du court-circuit. Notons aussi que la résonance à 100 Hz est plus dangereuse en triphasé sur nancé à 100 Hz que sur biphasé ou triphasé sur la phase médiane qui en biphasé sur la phase extérieure, vu le coefficient deux fois plus important pour le terme en cos 2 wt dans la relation (5).

Si l'angle des fréquences propres de la structure vaut 50 ou 100 Hz, la condition de resonance mécanique est atteinte, et l'amplitude du mouvement de vibration n'est limitée que par l'amortissement interne de la structure. D'où le risque de ruine de l'ouvrage.

D'un point de vue mécanique, la structure formée par le jeu de barres et sa suspension est caractérisée en sollicitation dynamique par ses fréquences et modes propres de vibration, un mode propre détermine celle-ci oscille naturellement à la fréquence propre correspondant à la définition de la structure lorsqu'elle est dans l'état d'équilibre.

$\frac{1}{\omega}$, soit 50 et 100 Hz en Europe.

On voit apparaître dans les expressions (5) et (6) la fréquence $\frac{2\pi}{L}$ du réseau et son premier harmonique, qui peuvent être représenté par une forme analytique aussi simple.

sont dans le rapport des courants et tout des cartes des courants.

$$\left(-\frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \cos \omega t - \frac{1}{2} e^{-\omega t/\tau} \right). \quad (6)$$

$$\text{Fitter median} = \frac{\text{d}}{I^2 e^2} \times \frac{\sqrt{3}}{I}$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}}$$

— défaut triphasé, $\phi = \frac{3\pi}{12}$. Tenant compte que I_e

ou L_2 est le courant de court-circuit biphasé efficace ;

continuité du moment de flexion dans le tube et articula-
tion sur le pilier.

articulation liaison B :

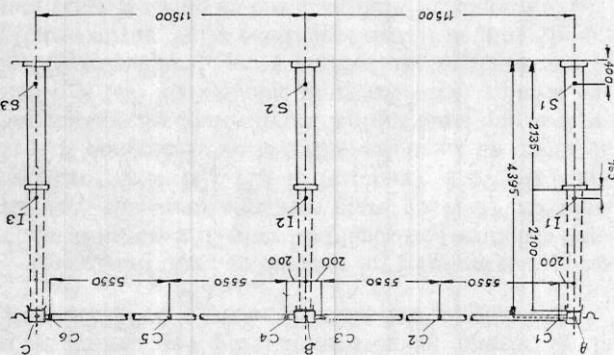
points de mesure du moment de flexion dans les barres.

C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆:

L_1, L_2, S_1, S_2, S_3 : points de mesure du moment de flexion dans les isolateurs

Fig. 3. — Structure D.

Fig. 3. — Structure D.



La figure 3 présente la structure, et spécifie le mode de fixation du tube sur les isolateurs aux différents points de sonction. Elle indique également les points de mesure du moment de flexion dans les tubes,

4.a. CAS DE LA STRUCTURE D

A titre d'application, nous avons procédé à l'analyse de deux structures de jéux de barres ayant fait l'objet d'études comparatives dans le cadre de la CIGRE, et pour lesquelles dans le nombre des résultats analytiques et des résultats expérimentaux sont disponibles [5] [6].

4. Applications

tation.

amener à adopter un pas de temps de 0,005 à de manière à présenter correctement la force exercée.

— dans une moindre mesure, le pas de temps diminue gradation dans le temps. Dans le cas présent, on est

capacité de chacun des modes à la charge appliquée,

ment en fonction du domaine de fréquence à pren-dre en compte, mais aussi en fonction de la parti-tion en fonction de la partie

La réponse est décomposée. La base des modes propres utilisés doit être déterminée non seule-

Le nombre de modes propres en termes des schémas dépendrait alors de deux facteurs [4] :

des modes propres du système conservatif associé $Kx + Mx = 0$. La qualité de la solution numérique

modale, qui consiste à décomposer la réponse en série d'ondes pour la méthode de superposition (1), on a opté pour la méthode de superposition

Enfin, pour calculer la réponse du système transi-

premier créer du déplacement transitoire, soit environ 0,1 s après le défaut) justifiant l'approximation de la négiger.

En ce qui concerne l'amortissement intégral structure (dans les cas envisagés) les taux d'amortissement observés décrivent logiquement de 3 à 4 %) et la période d'observation très courte (en effet 4 %) contre une maximale apparue en général lors de la

ces deux domaines en jouant sur la raidure flexionnelle EI, la masse répartie m et l'addition éventuelle de masses d'extrémités m_1 et m_2 .

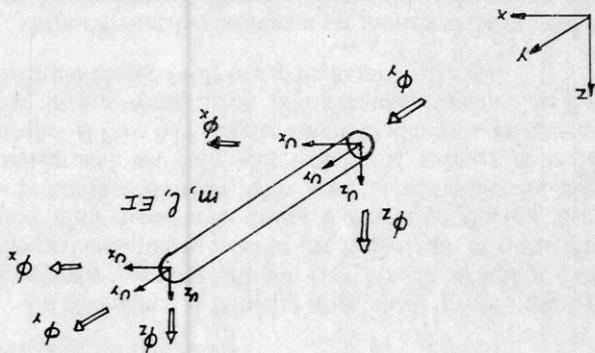
Pour caractériser correctement les isolateurs, il faudrait disposer de nombreux renseignements qui ne sont généralement pas donnés par le fournisseur. On se contente donc de la première fréquence propre mesurée et du coefficient d'influence statique propre en tête de l'isolateur. On peut chercher à resserrer

On part du principe que pour bien décrire le com-portement dynamique de l'isolateur, il convient que le modèle respecte ses propriétés fréquentielles et sa capacité de résistance des charges propres. Il est souhaitable de respecter également la forme des modes correspondants, ce qui ne peut s'obtenir qu'en respectant bien la répartition des masses et des raies.

Par contre, la caractérisation mécanique des isolants plus complexes. L'hypothèse qui consiste à assimiler leur comportement à celui d'une poutre unidimensionnelle et leur flexion à l'application d'un effort de traction et de compression n'est pas tout à fait exacte. En effet, lorsque l'on applique une charge à l'extrémité d'un isolant, il se déforme en flexion mais aussi en translation. La partie centrale de l'isolant se déplace vers l'axe des efforts et la partie périphérique se déplace vers l'extinction de la charge. Cela signifie que l'isolant est soumis à deux types de charges : une charge axiale et une charge transversale. Ces deux types de charges sont liés entre eux par la loi de Hooke. La relation entre la charge axiale et la charge transversale est donnée par la formule suivante :

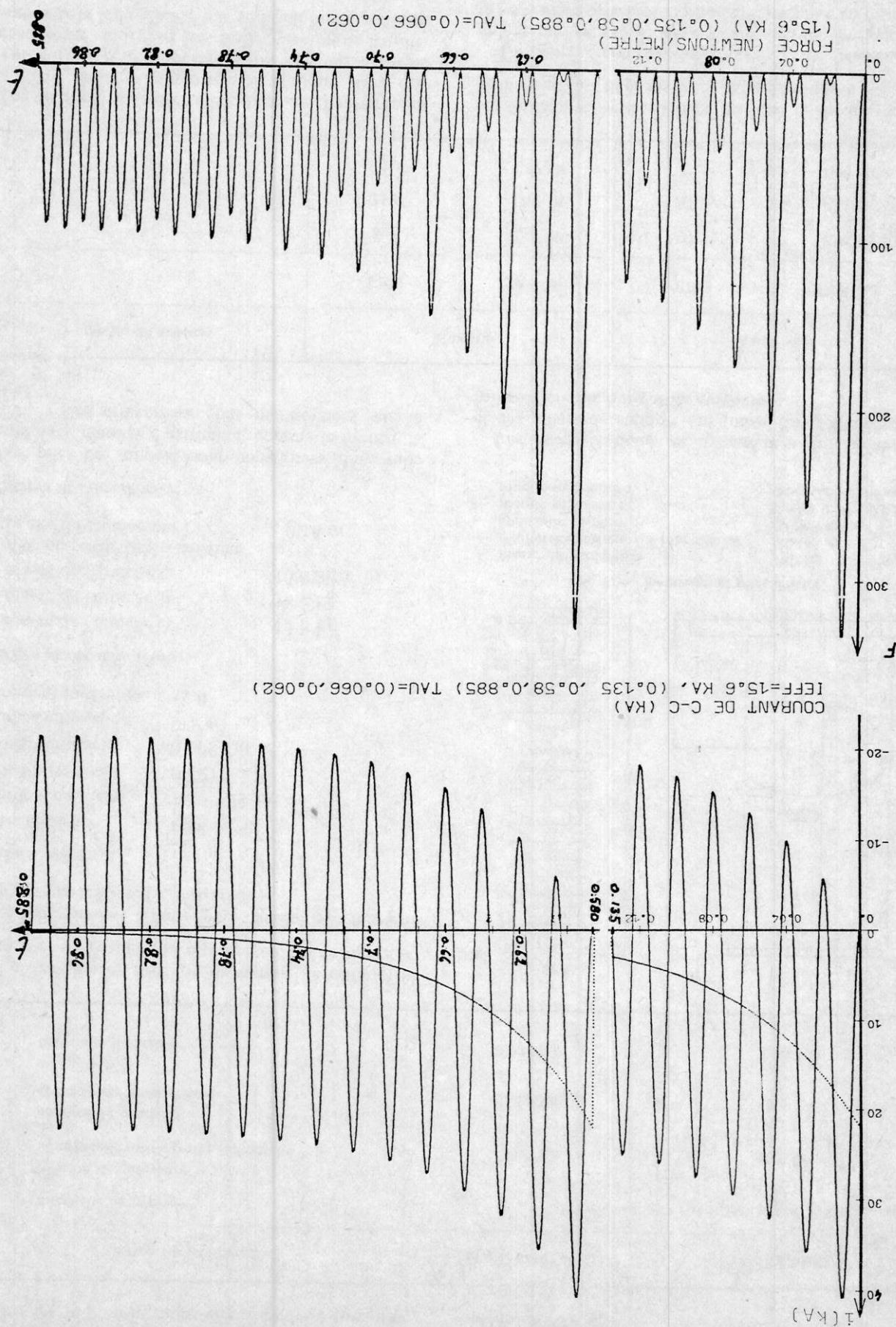
En général, les caractéristiques des tubes en cuivre sont bien conçues pour les conducteurs souterrains utilisés dans les bâtiments.

Fig. 2. — Élément de poutre utilisée.



L'élément de porte unique pour la discrétion offre des portes et des isolateurs sans déformation à l'effort siège de porte en flexion sans élément classique de barres et des isolateurs est l'élément classique de porte unique pour la discrétion (fig. 2).

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



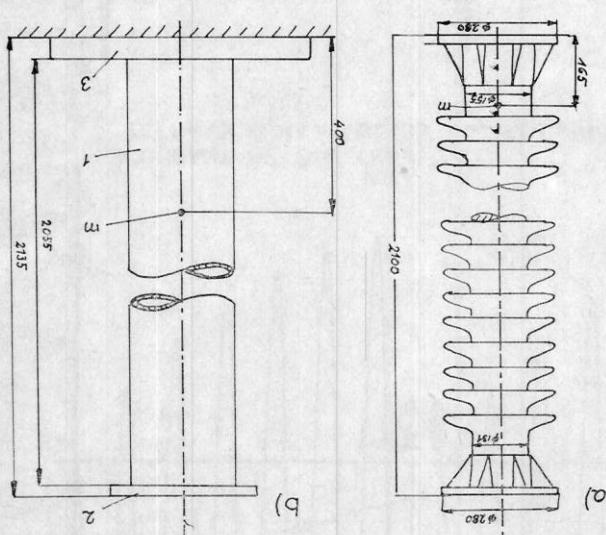
sur isolateurs assez souples, puisque la flexion de la suspension est déjà marquée dans le mode à 6,1 Hz. La figure 7 compare les contraintes de flexion cal-
culées par superposition modale sur une période de 0,1 s à celles relevées expérimentalement : en tous les points de mesure envisagées, la corrélation s'avère excellente, puisque l'écart reste pratiquement toujours inférieur à 10 %.

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 filtres a été réalisé par addition de masses loties.

numero du support	isolateur	f(Hz)	K(N/m)	f(Hz)	K(N/m)
1		21,5	$7,3 \cdot 10^6$	27,2	$1,46 \cdot 10^6$
2		21,5	$7,57 \cdot 10^6$	27,2	$1,77 \cdot 10^6$
3		21,5	$7,77 \cdot 10^6$	27,2	$1,88 \cdot 10^6$

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

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



Valeurs caractéristiques	premier court-circuit	réenclenchement	intervalle de temps	$0 < t < 0,135 \text{ s}$	$0,580 < t < 0,885 \text{ s}$	courant de court-circ.	composante asymétrique maximale	courant de court-circ.	composante harmonique	courant de court-circ.	constante de temps $\frac{R}{L}$
				0 < $t < 0,135 \text{ s}$	$0,580 < t < 0,885 \text{ s}$		41,0 KA	40,8 KA	15,6 KA	15,6 KA	0,062 s

reenclenchement, et est caractérisé par les valeurs suivantes :

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

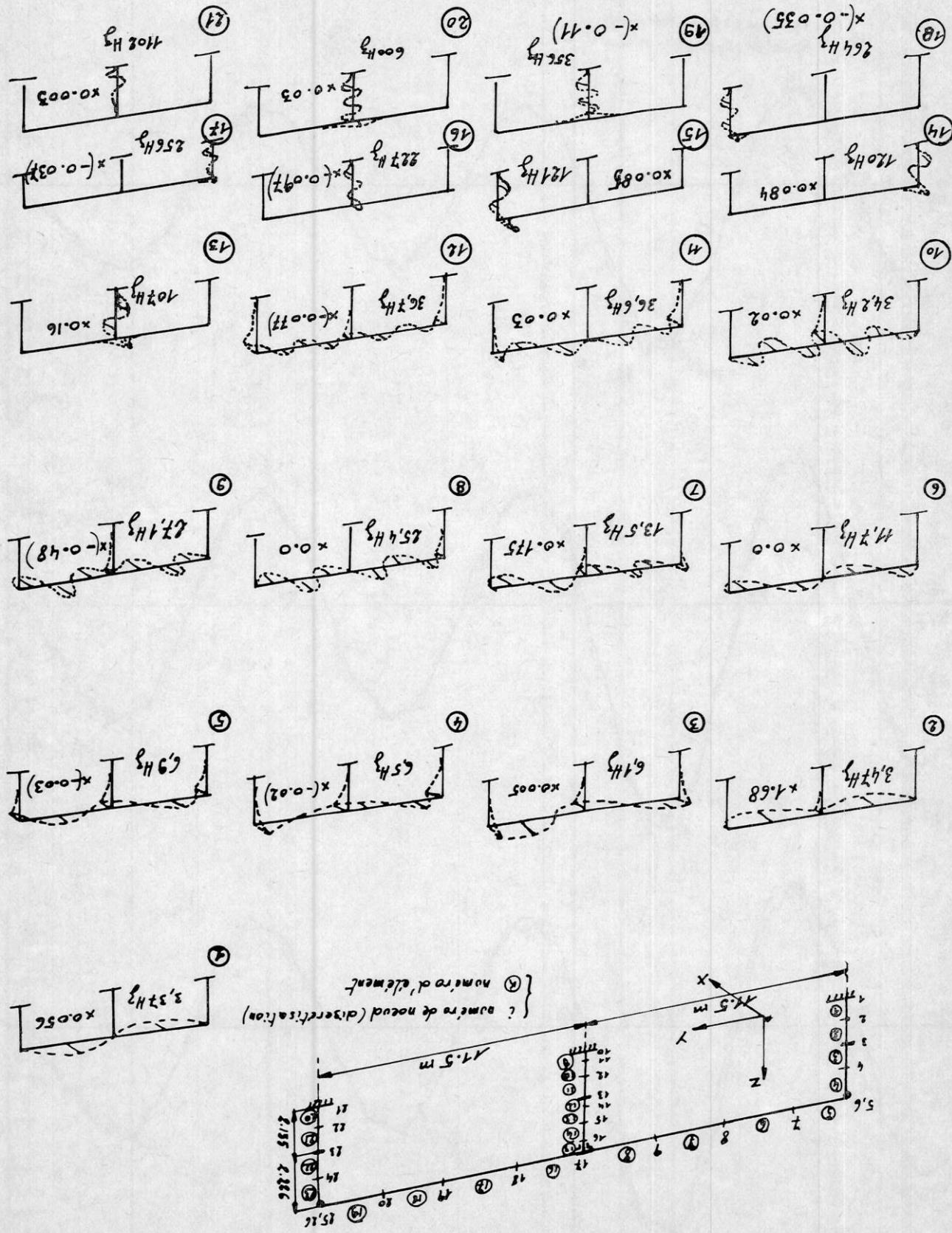
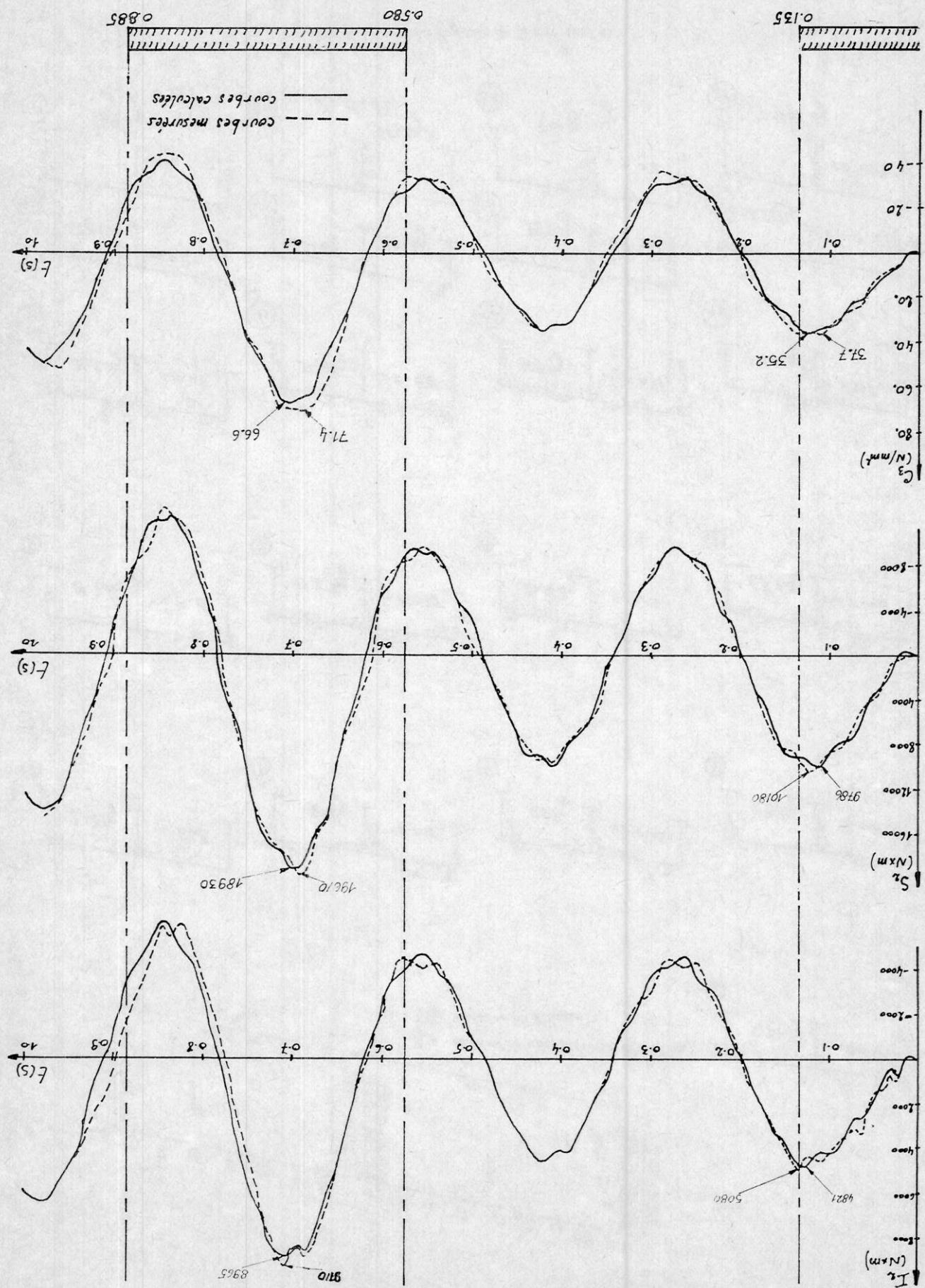
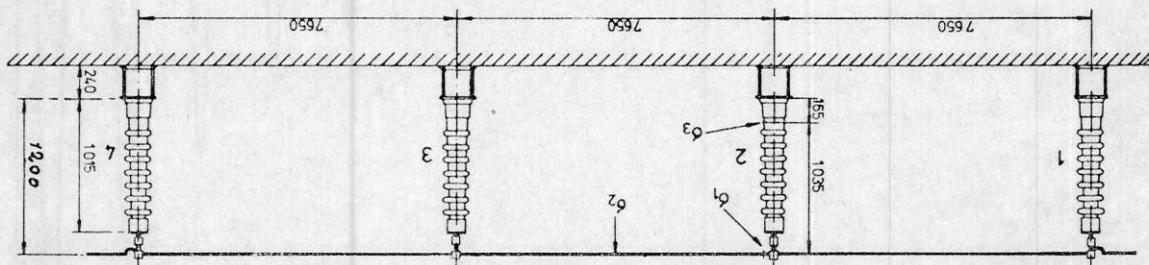


Fig. 7. — Structure D. Contraintes Flexion.



Conducteur tubulaire	Masses	1,06 kg/m	Module d'Young	(Aluminium)	Conducteur tubulaire	Masses	1,06 kg/m	Pièce de jonction	(Acier)	Diamètre extérieur	30 mm	Isolateurs-supports 1 à 4	Masses	47,6 kg	Fréquence naturelle	58,9 Hz	Diamètre intérieur	20 mm	(Stainless)	Masses	47,6 kg	Raccord du conducteur	Masses	1,4 kg	Emprise des barres 1 m	Le conducteur est fixe rigidelement à chaque point.	Courant de court-circuit 1 crete = 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. 8. — Structure A.



En effet, nous avons testé une nouvelle discrétesation, en raffinant la discrétesation totale et testant des raccoires moins rigides que les isolateurs. Les conditions de tests restent aux mêmes de 75 MN/m². Sans doute l'enchaissement des barres dans les raccoires de dommages 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. Notez que la figure 14 est réalisée dans le tableau de la figure 14.

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

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, la valeur moyenne, la discrétilisation la plus grossière donne lieu à une pointe de tension qui n'est pas complète par l'expérienced'Amortir la réponse des barres à pour modéliser les fréquences plus élevées des barres dans le modèle courbe pointillée. Cette fois, la comparaison avec la conséquence d'amortir la réponse des isolateurs selon l'expérience est très satisfaisante.

Elle viene que celle mesurée.

La figure 12 montre les contrastes dans les barres obtenues à partir des deux discrétisations. Il en résulte

On a ensuite procédé à une discrémination plus fine des barres, qui montre (figure 11) que la résonance des oscillateurs est en fait accompagnée d'une vibration des barres pour prendre un nombre d'ondes élevé. D'où la nécessité d'un village suffisamment fin des jeux de barres pour préserver les résultats du calcul, amortir comme le montrent les résultats de l'ouvrage qui, de barres pour préserver les résultats du calcul, amortir

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

L'autre structure analysee, denomme structure A dans les rapports CIGRE, est representee par la figure 8. La m^eme figure donne ses caracteristiques mecaniques, de m^eme que celles du defaut envisage. II en resultera les courants de court-circuit et force elec-

4.B. CAS DE LA STRUCTURE A.

inférior à 4 %. Seul l'ecart observe à la base de l'isolateur central (12) atteint 8 %, avec un dephasage plus marqué entre les r éponses calculées et mesures : ce fait peut s'expliquer par la caractéristique impaire des isolateurs au point de vue structural.

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

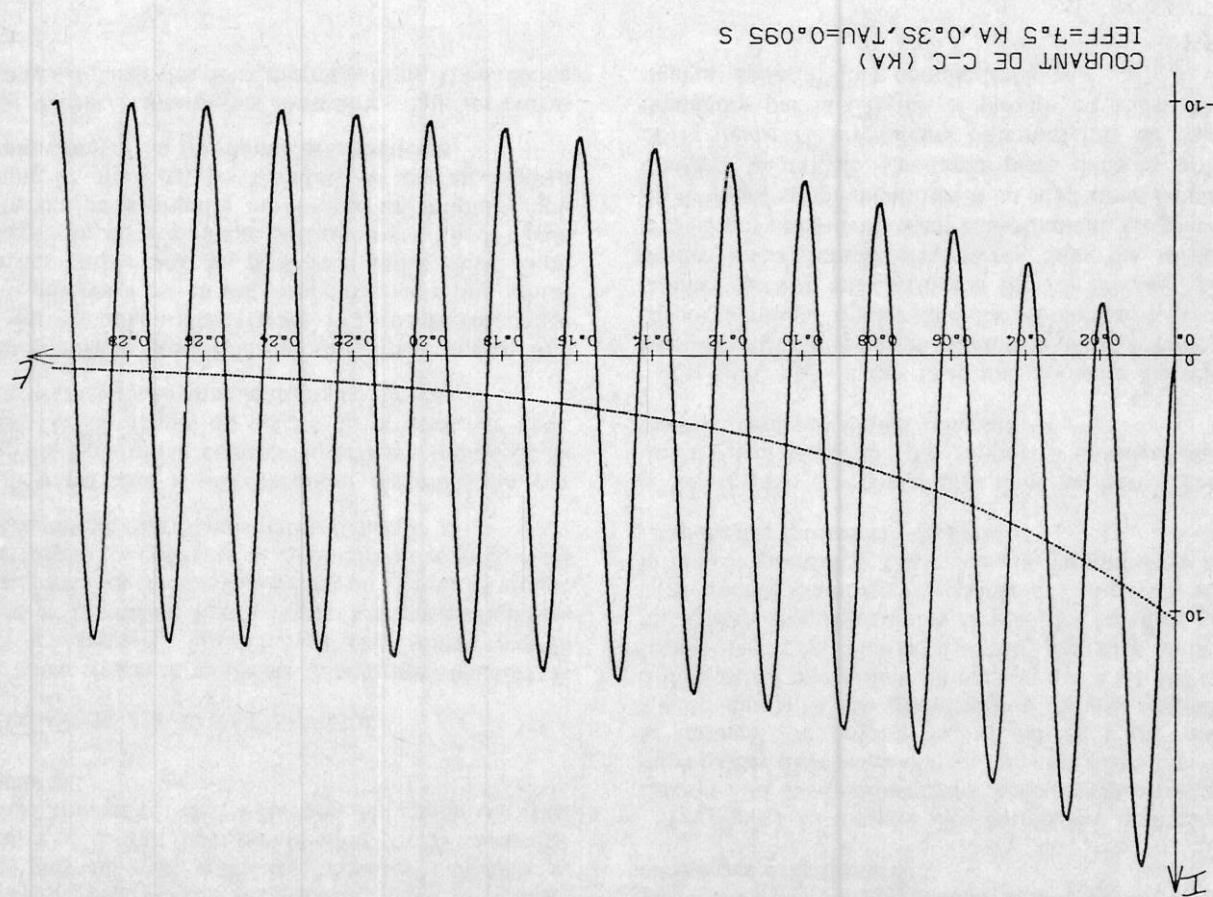
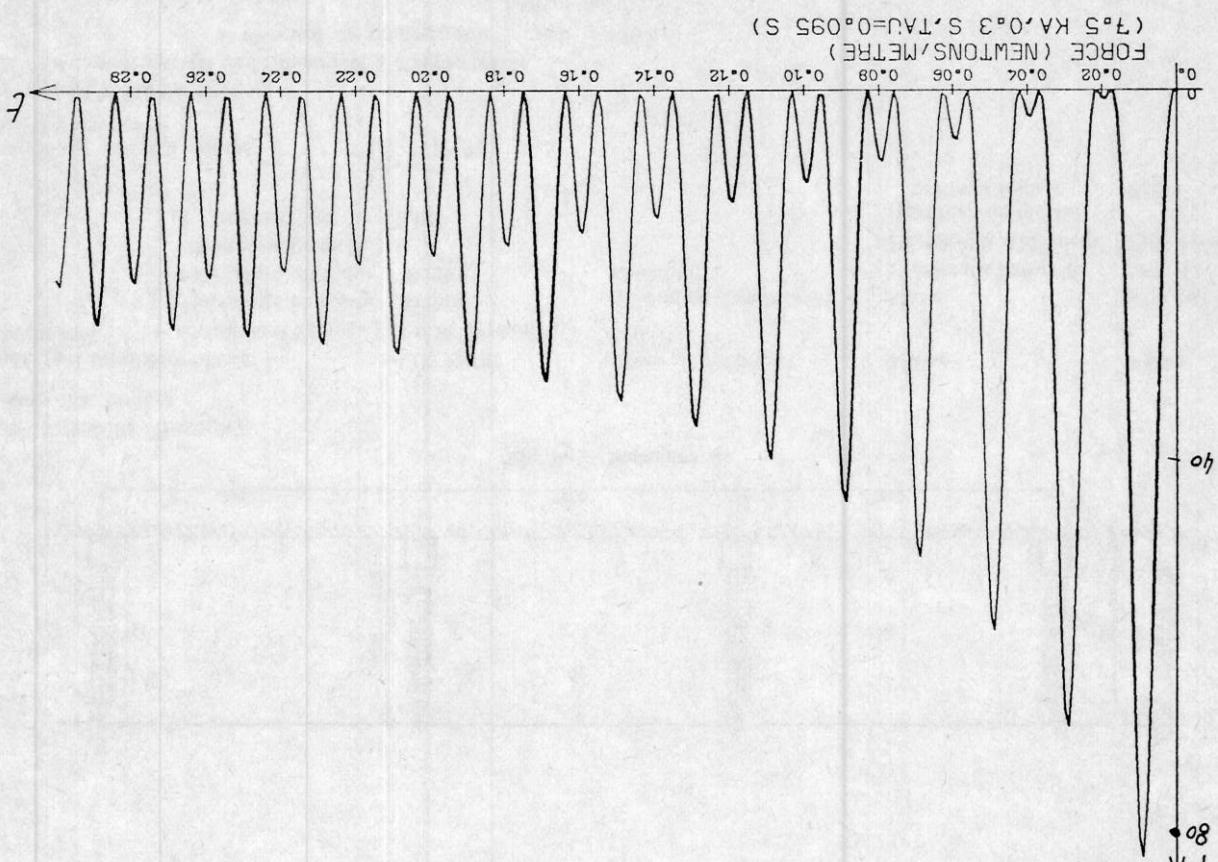


Fig. 10. — Structure A. 1^e discretisation.

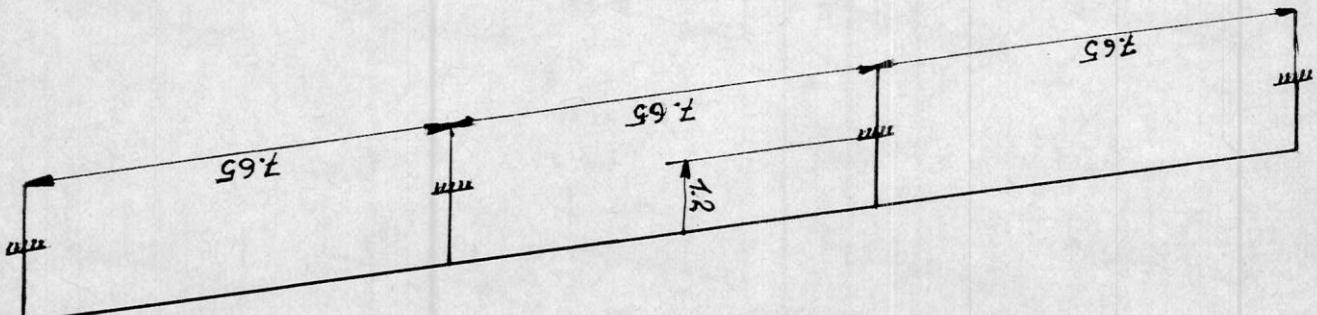
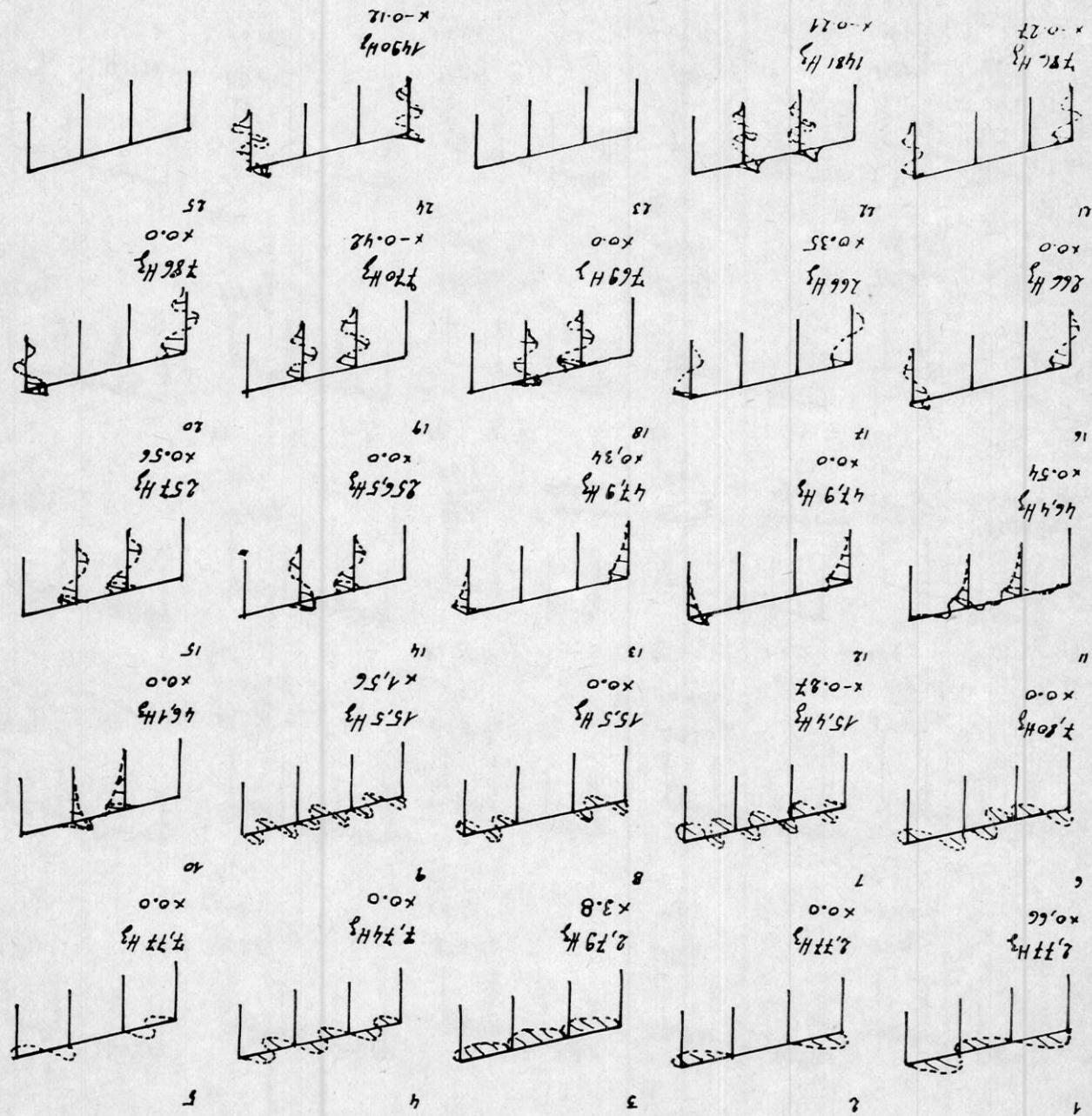


Fig. 11. — Structure A, 2^e dissociation.

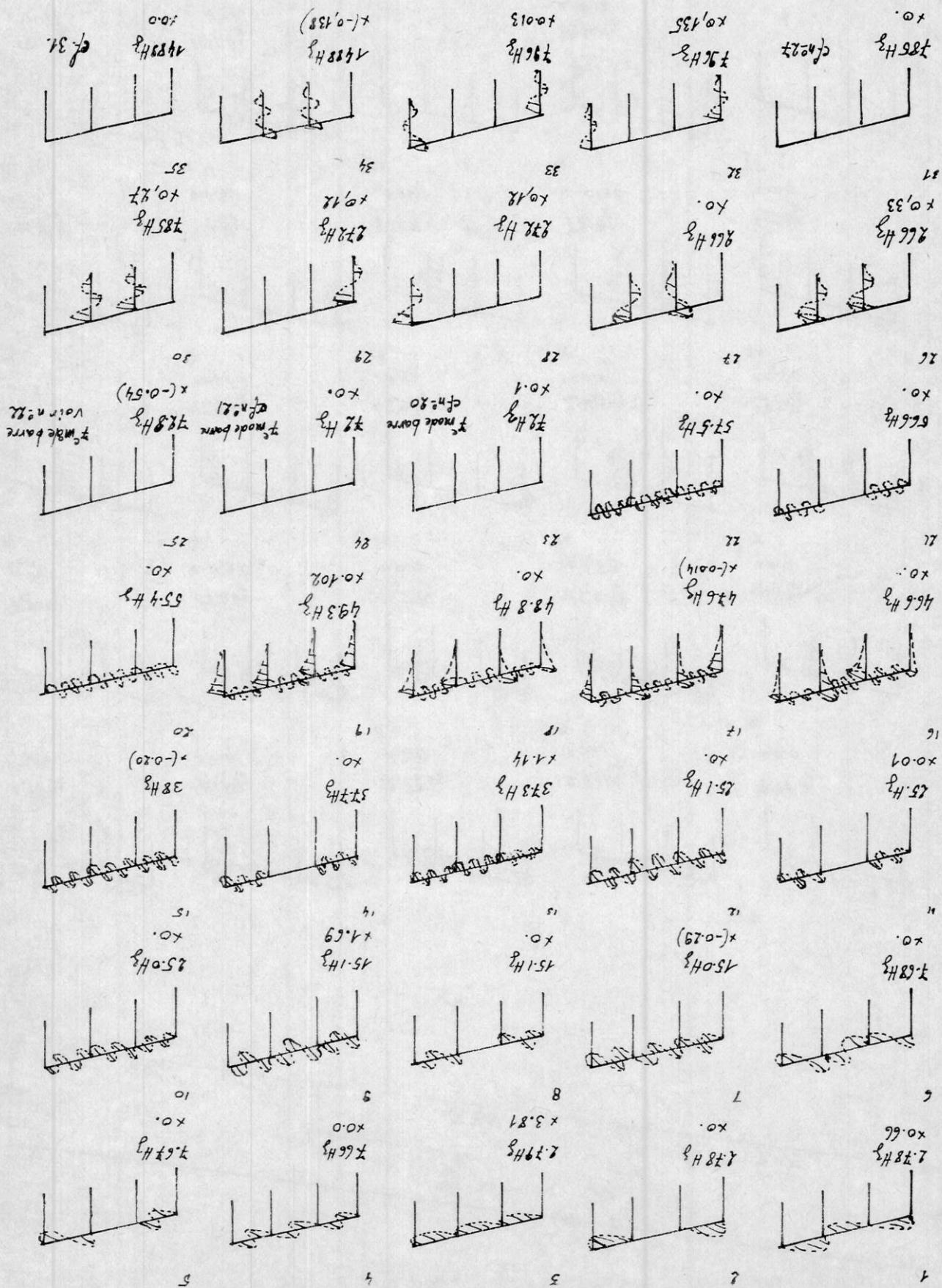


Fig. 13.

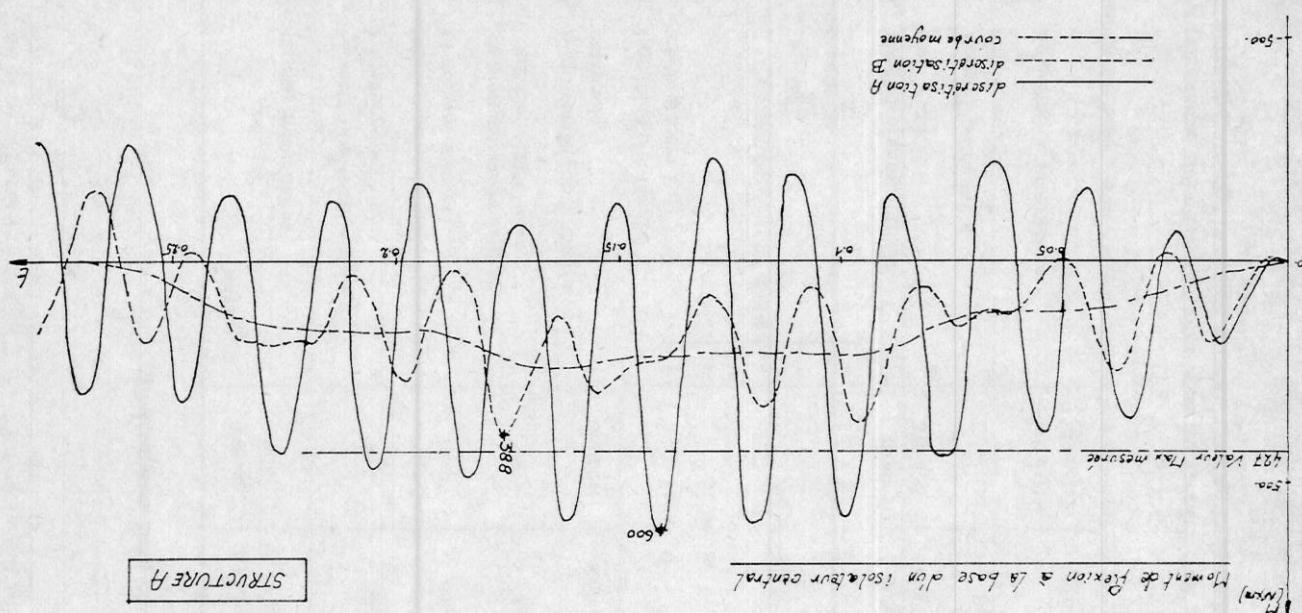


Fig. 12.

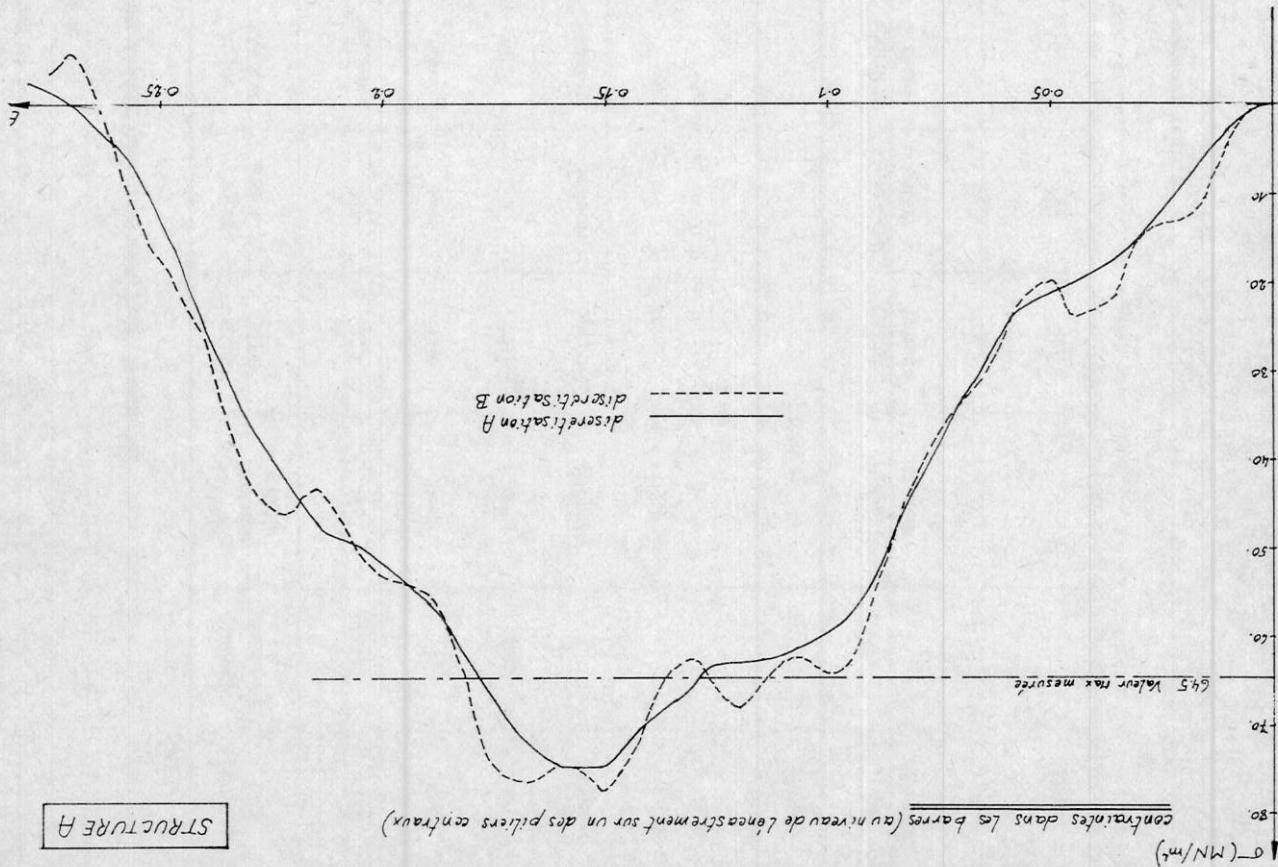


Fig. 14. — Structure A.

Comparaison entre efforts calculés et mesurés pour un modèle expérimental testé au F.G.H. Mannheim.

Institution	France EdF	Allemagne U. Erlangen	Hollande KEMA	Italie ENEL	Suède ASEA 1	Suède ASEA 2	Suède SSPB	Grande Bretagne CEGB	Valeurs mesurées	Belgique ULg
Remarques particulières										
1. Moment fléchissant maximal à l'isolateur 2 (Nm)	463	386	384	287	216,8	236	225	396	427	388
2. Emplacement du moment fléchissant maximal.	Base	Base	Base	Base	Base	Base	Base	Base	—	Base
3. Tension maximale dans le conducteur (MN/m ²)	60	78,4	79,1	68,5	60,5	73,7	55,4	94	64,5	76
4. Emplacement de la tension maximale.	Support	Support	Support	Support	Support	Support	Support	Support	Support	Support
5. Condition aux limites aux isolateurs 1, 2, 3, 4	1	$a_2 = 0$	$b \neq 0$	$a_2 \neq 0$	$b = 0$	$a_2 \neq 0$	$b = 0$	$a_2 = 0$	$b \neq 0$	$b \neq 0$
	2	$a_1 = a_2 = 0$	$b \neq 0$	$a_1 = a_2$	$b \neq 0$	$a_1 = a_2 = 0$	$b \neq 0$	$a_1 = a_2 = 0$	$b \neq 0$	$a_1 = 0$
	3	$a_1 = a_2 = 0$	$b \neq 0$	$a_1 = a_2$	$b \neq 0$	$a_1 = a_2 = 0$	$b \neq 0$	$a_1 = a_2 = 0$	$b \neq 0$	$a_2 = 0$
	4	$a_1 = 0$	$b \neq 0$	$a_1 \neq 0$	$b = 0$	$a_1 \neq 0$	$b = 0$	$a_1 = 0$	$b \neq 0$	partout
6. Type de machine utilisée pour le calcul	IBM 370-155	IBM 370-168	CDC 6400	Honeywell 6066	Calcul à la main	Honeywell 6000	Calcul à la main	Calcul à la main	IBM 370/158	
7. Temps d'utilisation de l'unité centrale.	—	13,5	357	826	—	73,2	—	—	357*	
8. Longueur du programme	1500 cartes 7500 octals	156 k	106 k	40 k	—	45 k	—	—	224 K*	

* Le programme utilisé (20.000 cartes) n'est pas spécifique au problème traité ce qui impose 224 K de mémoire centrale et induit une certaine inertie au niveau du temps d'utilisation de l'unité centrale.

- [1] A. CALVAYER. — *Electricité théorique*. — Fascicule 1. — Editions Dervouaux. — Liège 1971 pages V.33 à V.35.

[2] Efforts électrodyamiques dans les postes haute tension. Travail de Film d'Etudes de C. Desoto quay. Université de Liège 1978.

[3] SAMCEF, *Système d'analyse des milieux continus par éléments finis*. Modules Théorie et Utilisation édités par le LTAS (Laboratoire de Techniques Aéronautiques et Spatiales de l'Université de Liège).

[4] J.L. LILIEU. *Efforts électrodyamiques dans les postes H.T. avec jeu de barres rigides*. Note interne D/1978/0480/10 mai 1978.

[5] G. PALANTE. *Comparaison de conducteurs rigides et de leurs supports dans les conditions de court-circuit. Comparaison entre valeurs calculées et mesures*. 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 (WG02)03-IWD April 1977.

[7] G. SANDER, M. GERARDIN, C. NYSSEN, M. HOGGE, Accuracy Versus Computational Efficiency in Nonlinear Dynamics. Int. Conf. FE-NOMECH 78, Stuttgart, 30 aout-1^{er} septembre 1978 (à paraître).

REFERENCES

- la possibilité de couplage entre modes fortement excitées,
 - De plus, le court-circuit sera toujours envisagé de telle sorte que :
 - l'asymétrie soit maximale,
 - il soit triphasé symétrique, autre cas c'est la phase exigeante la plus sollicitée.
 - L'expérimentateur 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 calcul des structures par éléments finis SAMCEF de développement et sera intégrée dans le programme de calcul des postes par éléments finis LTAS* de l'Université de Liège [7].
 - Un tel logiciel de calcul est actuellement en cours de développement pour le LTAS* de l'Université de Liège [7].

* Laboratoire de Techniques Aéronautiques et Spatiales.

