

Cat. No. 80 CH 1583-4

Rifolte

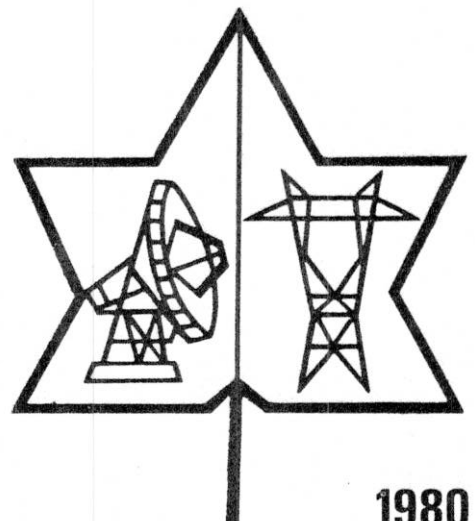
THE INSTITUTE
OF ELECTRICAL
AND ELECTRONICS
ENGINEERS, INC.

CANADIAN RÉGION (7) CANADIENNE
SECTION DE MONTRÉAL SECTION

October 15, 16, 17, 1980
Montréal
15, 16, 17 Octobre 1980

CANADIAN COMMUNICATIONS & POWER CONFERENCE CONFÉRENCE CANADIENNE SUR LES COMMUNICATIONS & L'ÉNERGIE

Available from
IEEE Service Center
Single Publication Sales Dept.
445 Hoes Lane
Piscataway, N.J. 08854



Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limits of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through the Copyright Clearance Center, P.O. Box 765, Schenectady, NY 12301. Instructors are permitted to photocopy isolated articles for noncommercial classroom use without fee. For other copying, reprint or republication permission, write to Director, Publishing Services, IEEE, 345 E. 47 St., New York, NY 10017.

SOLLICITATIONS ELECTRODYNAMIQUES DANS LES POSTES LORS DE DEFAUTS

J.L. LILLEN, M. GERADIN et P. PIROTTE

UNIVERSITE DE LIEGE
(Belgique)

SOMMAIRE

Il est important de pouvoir vérifier ou encore prévoir l'importance des conséquences lors de l'apparition d'un défaut polyphasé (le plus souvent biphasé) sur les éléments constitutifs d'un poste. L'intensité du courant de défaut augmente continuellement dans la plupart des pays, et il n'est nullement besoin d'insister sur l'importance de limiter au maximum le risque de défaillance des ouvrages pour assurer à l'ensemble une fiabilité suffisante.

Le présent rapport formulera les équations conduisant au calcul des efforts électrodynamiques. Ensuite il donnera les bases de la méthode de calcul par éléments finis permettant de résoudre numériquement le problème.

L'application de cette méthode à un cas pratique ayant pour objet une vérification expérimentale terminera la note.

L'exemple choisi est celui d'un jeu de barres en câbles flexibles, ce qui représente une situation particulièrement complexe pour l'application de la technique de résolution.

1. POSITION DU PROBLEME

Lors de défauts se produisant sur les constituants du réseau, en particulier dans les postes, on peut enregistrer des intensités de courant très élevées. Leur amplitude est directement liée au type de défaut et à la localisation de celui-ci par rapport aux générateurs. On observe dans de nombreux pays une augmentation de la valeur du courant de défaut et de ce fait les spécifications pour le matériel sont de plus en plus contraignantes [1] [2].

Dans cette perspective il est important de déterminer avec une précision suffisante les sollicitations auxquelles seront soumises les structures en général, les jeux de barres des postes en particulier. Le calcul de ces sollicitations et la réponse de la structure nous renseigneront quant à la sécurité par rapport à la ruine de l'ouvrage et quant aux distances minimales à respecter entre les conducteurs sous tension pour éviter les amorçages lors des balancements.

Deux situations sont à examiner : les jeux de barres rigides et les jeux de barres en câbles souples.

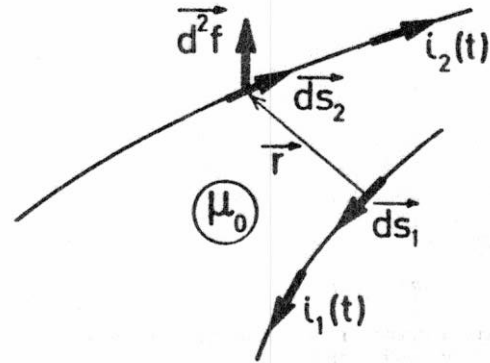
Dans le premier cas une hypothèse réaliste consiste à supposer constante la distance entre les conducteurs. Un tel travail a été entrepris antérieurement à l'Université de Liège et a conduit à des résultats comparables aux essais et méthodes déjà existants [3], [4], [5]. Le problème des jeux de barres en câbles flexibles fait actuellement l'objet d'une étude au sein du groupe de travail 23-22 de la C.I.G.R.E. La solution dans ce dernier cas est beaucoup plus

complexe compte tenu du caractère non linéaire du phénomène.

Le présent rapport présente l'état de nos recherches en ce domaine et met l'accent sur le problème de sa résolution numérique. Les résultats obtenus sont discutés et comparés avec les mesures obtenues lors d'un essai en vraies grandeurs.

2. ANALYSE DE LA SOLLICITATION

Nous rappellerons ici la définition de la force agissant sur un conducteur parcouru par un courant i_2 et soumis au champ magnétique créé par un conducteur parcouru par un courant i_1 .



$$\vec{d}^2f = \frac{\mu}{4\pi} i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot \frac{d\vec{s}_1 \wedge (d\vec{s}_2 \wedge \vec{r})}{r^3}$$

(Loi de Biot-SAVART)

La variation de l'intensité du courant correspond à la fermeture instantanée d'un circuit R,L alimenté par une force électromotrice de module constant. Nous n'envisagerons donc qu'une seule constante de temps et l'asymétrie du courant sera uniquement fonction de la phase de la force électromotrice équivalente au moment de l'apparition du défaut. La constante de temps $=L/R$ dépend évidemment de la localisation du poste considéré par rapport aux centrales du réseau. En Belgique, compte tenu des liaisons relativement courtes, on peut envisager des constantes de temps de l'ordre de 100 à 150 ms à peu de distance des générateurs.

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

Où : I_{eff} représente la valeur efficace du courant de court-circuit permanent, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ est la pulsation du réseau et ϕ est

un angle en rapport avec l'instant d'apparition du défaut. Dans le cas de deux conducteurs parallèles soumis à un court-circuit biphasé et si on considère une asymétrie maximale ($\phi = -\pi/2$), la force agissant par unité de longueur prend la forme:

$$f_{li} = \frac{1,6 I^2}{d} \times \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cos 2\omega t - e^{-\gamma t} \cos \omega t + \frac{1}{2} e^{-2\gamma t} \right\}$$

où l'on voit apparaître deux termes continus et deux termes harmoniques de fréquence $\omega/2\pi$ et ω/π (50 et 100 Hz en Europe). La fig.1 reprend l'allure de f en fonction du temps dans le cas particulier d'un court-circuit biphasé de 15,6 kA avec $\gamma = 1$ s⁻¹. (supposée constante) et rétablissement sur défaut en $t = 0,58$ s.

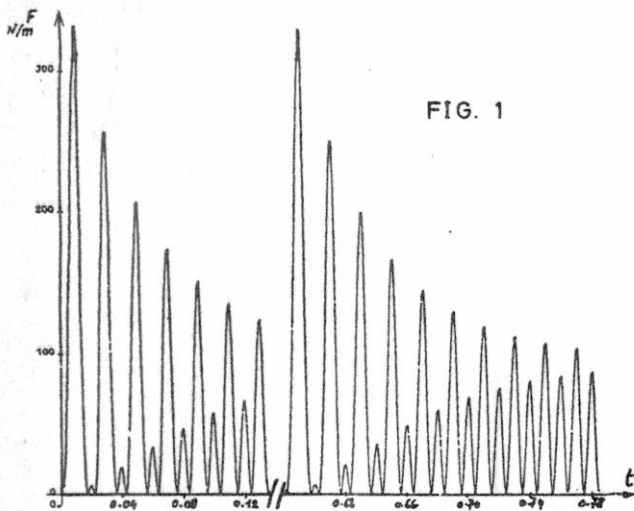


FIG. 1

3. METHODE DE CALCUL

3.1 Base théorique

Deux hypothèses ont été retenues pour la méthode envisagée:

- Les câbles sont supposés infiniment flexibles (pas de rigidité flexionnelle).
- De plus les amortissements sont négligés.

L'élastodynamique des systèmes géométriquement non linéaires peut être traitée par une description Lagrangienne (référence à l'état non déformé initial) du principe de Hamilton (minimisation de l'énergie totale du système en mouvement entre deux instants). La discrétisation spatiale de cette formulation est réalisée au moyen d'éléments finis isoparamétriques et la discrétisation temporelle par intégration directe suivant le schéma implicite de Newmark.

Pour les détails du formalisme on se référera à [6].

3.2 Application

a) Structure

=====

Elle est reprise en annexe et le tableau indique ses données mécaniques ainsi que le cas de sollicitation imposé.

Le relevé des tensions dans les câbles a été effectué côté Nord par bielles de mesure. Les moments dans les colonnes Nord ont également été relevés par strain-gauge au niveau $Z = 0,78$ m.

Les déplacements aux points d'ancrage Nord du câble ont été mesurés par des capteurs de déplacement.

La trajectoire dans le plan YZ du point milieu des câbles a pu être relevée grâce à des caméras rapides situées dans l'axe des câbles derrière le portique Sud.

b) Discrétisation, temps de calcul et mémoire requise

=====

La structure a été discrétisée par éléments finis de câbles pour les câbles et dérivations, tandis que pour les portiques la théorie linéaire des éléments poutre classique a été adoptée. Le calcul envisage simultanément la présence des portiques, des câbles et des dérivations; l'effet de la température est également pris en compte.

c) Caractéristiques de l'étude numérique

=====

- Période de temps étudiée : 2,32 s.
- Nombre de degré de liberté : 306 dont 36 sont fixes
- Pas de temps : 0,0025 s.
- Ordinateur utilisé : I.B.M. 370/158
- temps C.P.U. : 6 heures
- Mémoire requise 368 Kbytes

4. COMPARAISON CALCULS-RELEVES EXPERIMENTAUX

Les fig. 3 et 4 envisagent la trajectoire des câbles à mi-portée dans un plan YZ (la courbe en pointillé est la courbe expérimentale). On distingue nettement la présence d'un coup de fouet (surtout à la fig. 3) qui est souvent à l'origine de la contrainte maximale.

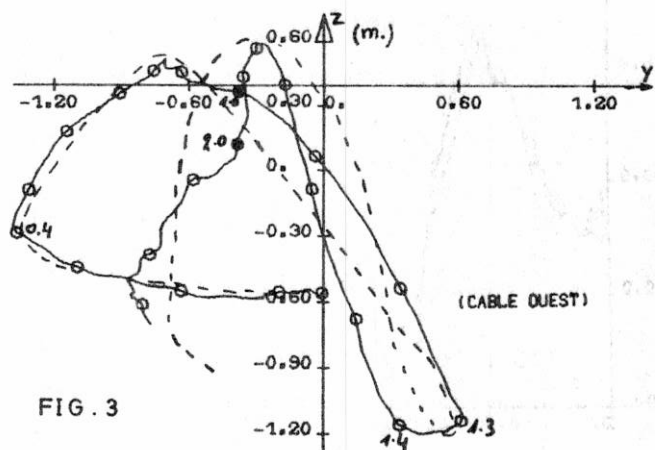
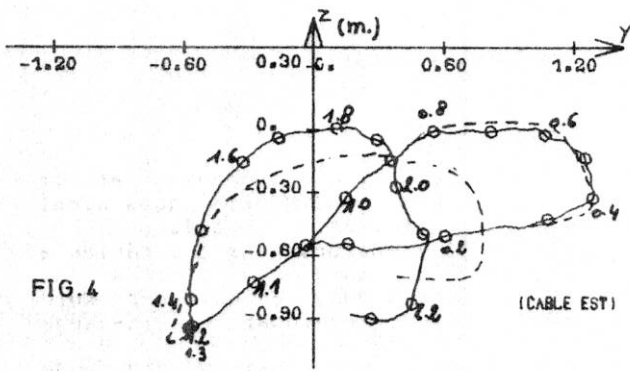
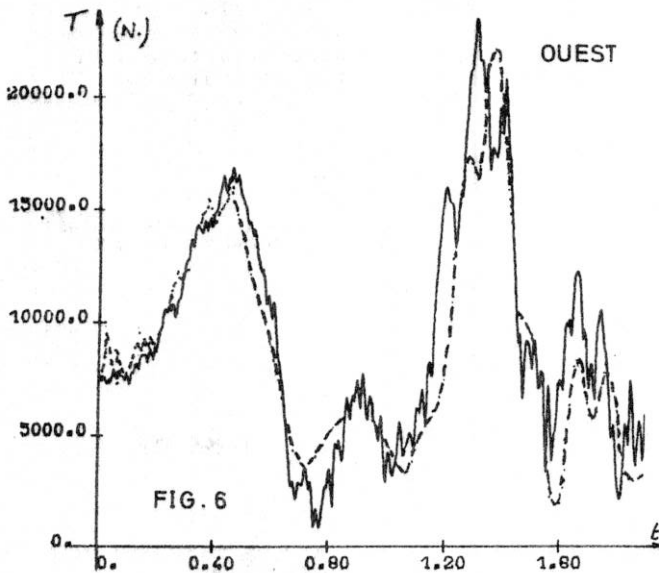
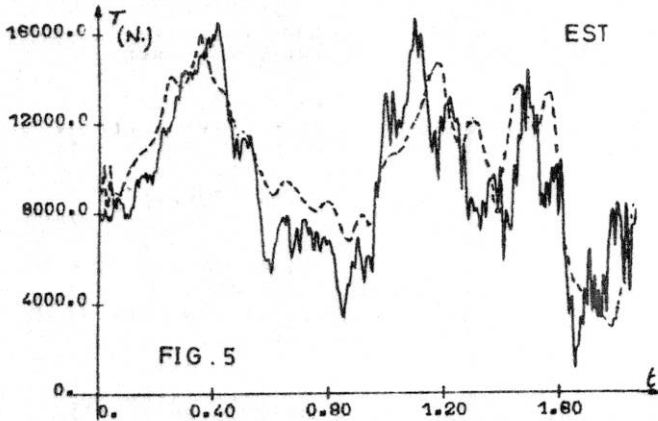


FIG. 3

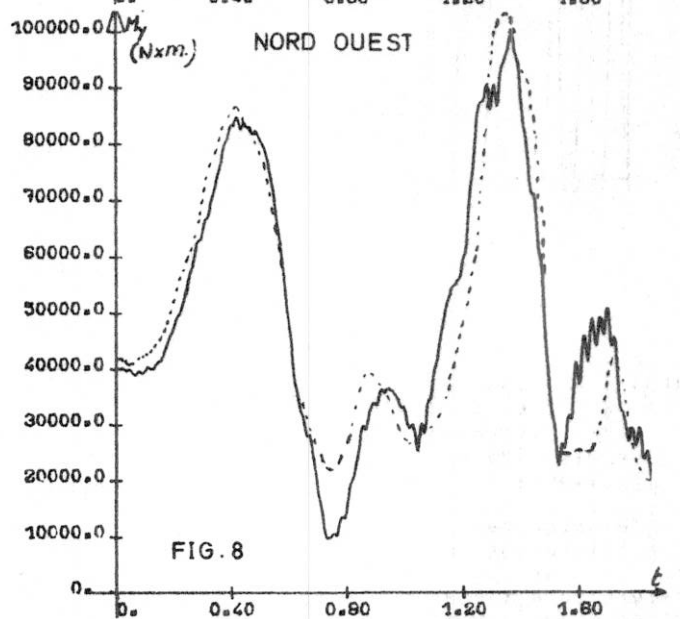
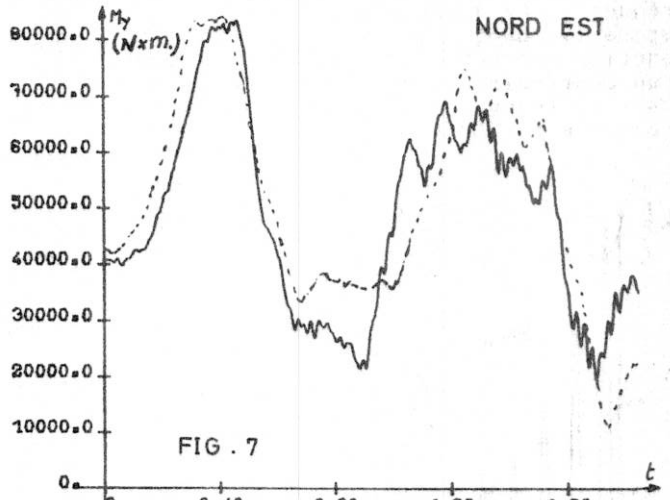


La comparaison des courbes numériques et expérimentales est en excellent accord.

Les fig. 5 et 6 reprennent l'évolution de la tension dans les câbles aux points d'ancrage Nord. Notons la dissymétrie entre les deux courbes pour une position géométriquement identique, avec comme seule différence la présence de dériviatives longues. Ce fait est principalement lié à la position des ancrages des dériviatives. En effet, à l'Est la répulsion du câble est freinée par la retenue des dériviatives, ce qui n'est pas le cas en Ouest. Cet effet est favorable dans le sens d'une limitation des contraintes comme on peut le constater sur la fig. 5 par rapport à la fig. 6. L'écart par rapport aux courbes expérimentales est du même ordre de grandeur que celle des erreurs expérimentales.



Les fig. 7 et 8 montrent l'évolution du moment de flexion dans les colonnes du portique Nord ($Z=2.78$ M) et la fig. 9 indique l'évolution du déplacement du point d'ancrage Nord du câble Est. On remarquera la similitude des courbes 5 et 8 qui s'explique par l'absence quasi-totale d'effet inertiel du portique; celui-ci suit de manière presque statique l'évolution des câbles. Les résultats des figures 7 et 8 sont qualitativement similaires aux valeurs expérimentales mais la courbe 9 révèle des écarts plus significatifs. Ces écarts peuvent très probablement s'expliquer par la présence du point fixe nécessité par le capteur de déplacement.



5. CONCLUSIONS

La méthode de calcul par éléments finis conduit à des résultats très comparables aux relevés expérimentaux.

Les écarts s'expliquent de façon plausible. Il est dès lors réaliste de recourir au calcul pour vérifier la tenue des structures câblées soumises à des courants de défaut d'intensité de plus en plus élevés (63 kA en France, 100 kA en R.F.A., 40 kA en Belgique) tant du point de vue mécanique (ruine) qu'électrique

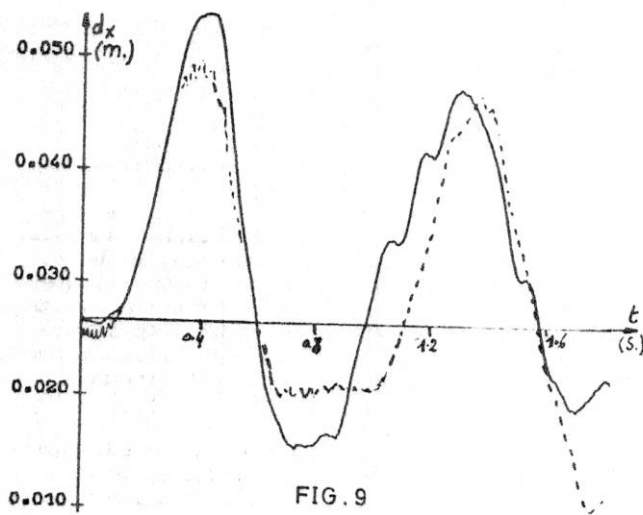


FIG. 9

(réduction de la distance d'isolement).
 Les recherches actuellement en cours à l'Université de Liège (I.A.S.I.I.U.I. d'ELECTRICITE MONTEFIORE) poursuivent deux objectifs principaux :

- 1) Une plus grande efficacité du processus d'intégration temporelle et
- 2) L'application de la méthode à l'étude des conducteurs en faisceaux (phénomène de contact).

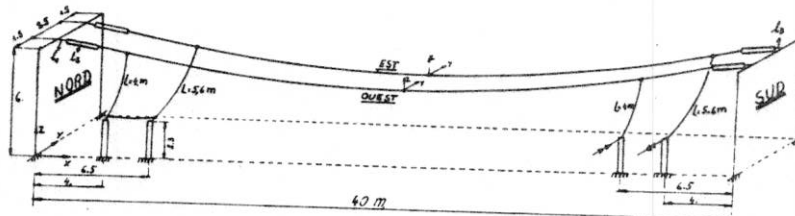
REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement LABOPELEC (Laboratoire Belge de l'Industrie Electrique) où les essais furent effectués, pour l'autorisation de présenter les résultats expérimentaux contenus dans ce rapport.

REFERENCES

- [1] Etudes relatives à l'augmentation des courants nominaux des jeux de barres. FORD, CENANOVIC, CRAIG, HUESTIS, SHORTT Rapport CIGRE 23-04 1976
- [2] Incidence de l'augmentation des courants de court-circuits sur la conception des ouvrages à 400 kV du réseau de transport d'Electricité de France. THOMAS, RIGOT, BENISTAN, KUPIEC, CASALE, ROUSSEL, GUILLOT. Rapport CIGRE 23-06 1976
- [3] Valeurs calculées et mesurées des efforts dynamiques dus aux court-circuits sur une structure d'essai avec et sans réenclenchement. G.HOSEMANN, D.TSANAKAS ELECTIRA n° 63, pp 147 à 163.
- [4] Efforts électrodynamiques dus aux courants de court-circuit dans les postes H.T. C.DESTOQUAY, M.GERADIN, J.L.LILLIS. Revue A.I.M. Liège, n° 1, 1979
- [5] Tests to measure the forces on rigid bus during faults. CRAIG. Ontario Hydro, Report 76-83-K, février 1976
- [6] Accuracy versus computational efficiency in non-linear dynamics. SANDER, GERADIN, NYSSSEN, HUGGE. Proceeding of the International Conference on Finite Elements in Non-linear Mechanics. FENOMECH 78 (Stuttgart) Publ. Co., Amsterdam 1979, part II pp. 315-340.

ANNEXE



- | | | |
|---|--|---|
| <p>1. CABLES (y compris les dérivation)</p> <p>A = 324 10⁻⁶ m²
 E = 12 10¹⁰ N/m²
 α = 16,8 10⁻⁶ °C⁻¹
 ρ = 8920 kg/m³
 P = 28,35 N/m
 C_m = 389 J/kg°C
 α_{ie} = 0,0172 10⁻⁶ Ωm(20°C)
 K = 0,00393 °C⁻¹
 Coeff. convection = 35 J/m²s°C</p> <p>2. SYSTEME D'ANCRAGE (voir figure)</p> <p>l₁ = 0,325 (étrier) + 1,407 m (3,2 kg)
 l₂ = 1,541 m (isolateur, 52,3 kg)
 l₃ = 0,325 (étrier) + 1,107 m (6,3 kg)</p> <p>(EA)_{l₁} ou l₂ = 18 10⁶ N
 (EA)_{isolateur} = 30 10⁶ N</p> | <p>3. MASSES CONCENTREES SUR LES CABLES</p> <p>aux attaches des dérivation : 1,635 kg
 à l'extrémité des isolateurs : 6,7 kg (côté câble)</p> <p>4. MASSES CONCENTREES SUR LES PORTIQUES :</p> <p>aux interfaces colonne-traverse : 62,2 kg</p> <p>5. PORTIQUES</p> <p>ρ = 7860 Kg/m³
 E = 21 10¹⁰ N/m²
 G = 8,08 10¹⁰ N/m²</p> <p>a) traverses A=10,6 10⁻³ m²
 I_{f max} = 11,2610⁻⁵ m⁴
 I_{f min} = 3,92 10⁻⁵ m⁴
 I_{extension} = 0,11 10⁻⁵ m⁴</p> <p>b) colonnes A=11,84 10⁻³ m²
 I_{f max} = voir ci-dessous
 I_{f min} = 5,1 10⁻⁵ m⁴
 I_{extension} = 0,13 10⁻⁵ m⁴</p> <p>colonne nord : (EIf_{f max}) = 22,26 10⁶ Nm²
 colonnes S.O. : (EIf_{f max}) = 18,69 10⁶ Nm²
 colonnes S.E. : (EIf_{f max}) = 20,27 10⁶ Nm²</p> | <p>6. FREQUENCES PROPRES DES PORTIQUES</p> <p>Portique sud : f₁ = 3,98 Hz (symétrique)
 f₂ = 4,95 Hz (antisymétrique)</p> <p>7. COURANT DE COURT-CIRCUIT</p> <p>I_{eff} = 29,7 kA
 I_{cr} = 73,3 kA (à la crête)
 t_{c.c} = 0,8s
 τ = 0,033s (constante de temps)
 I² (t) = 715 A² s</p> <p>8. CONDITIONS INITIALES</p> <p>température ambiante : 14°C
 température initiale des conducteurs : 11
 tensions dans l'axe du câble aux ancrages nord :</p> <p>7850 N à l'est
 7650 N à l'ouest</p> <p>Flèches à mi-portée :</p> <p>0,95 m à l'est
 0,965 m à l'ouest</p> |
|---|--|---|