

FASCICULES DE CONDUCTEURS ET EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES
VERS UNE APPROCHE NUMERIQUE FIABLE
J.-L. LILLEN
M. EL ADNANI

UNIVERSITE DE LIEGE
Sart Tilman (B.28) B.4000 LIEGE
Belgique

Résumé

En cas de court-circuit, les conducteurs magnétiques responsables d'un "étrangement" du faisceau d'un faisceau subissent des forces d'origine électro-magnétique qui provoquent un "étrangement" du faisceau. Un programme numérique spécifique donne accès à la description complète du phénomène. Ce programme nous a permis de mener une étude paramétrique qui a dégagé trois paramètres adimensionnels donnant accès au pic de tension et conduisant donc à un premier dimensionnement, simple mais sûr, des entretoises et des structures d'ancrage. Ces paramètres, en petit nombre, conduisent à des indices de sensibilité qui font percevoir l'agencement dans quelle direction orienter la conception pour optimiser la structure.

Bien entendu pour un dimensionnement fiable prenant en compte le caractère dynamique des efforts, il importe de suivre grâce à l'utilisation de notre programme l'évolution temporelle de toutes les grandeurs mécaniques et électriques.

1. Introduction

Tant au point de vue de l'exploitation optimale des réseaux et des ouvrages existants que de l'amélioration de la fiabilité des nouvelles installations, la prise en compte des courants de défaut d'intensité très élevée s'avère un élément majeur dans le dimensionnement du matériel.

Les conséquences de ces intensités élevées déjà préoccupantes pour des courants de 20 kA de viennent critiques pour des défauts atteignant 60 à 100 kA.

L'utilisation des faisceaux de conducteurs équivalente à 220 kV et de rigueur au-delà. Cette géométrie est nécessaire pour maintenir le champ électrique en deçà du seuil d'effet de couronne. L'écartement des conducteurs au sein du faisceau est assuré par des entretoises qui empêchent le contact des conducteurs dans les conditions normales d'exploitation : vent, givre, surcharge temporaire, etc...

En cas de court-circuit, quel qu'il soit, les conducteurs subissent des forces d'origine électromagnétiques qui provoquent un "étrangement" du faisceau. En effet, la faible espacement entre les conducteurs du faisceau est à l'origine de forces d'attraction très importantes. Il en résulte un rapprochement brutal des sous-conducteurs suivi très souvent d'un contact survenant quelques millisecondes (5 à 120 selon le cas) après le début du court-circuit.

Ce phénomène peut dans certains cas conduire à une déformation non seulement des entretoises, mais également les structures supports et les chaînes d'ancrage.

Le phénomène est à superposer aux éventuels efforts entre phases (court-circuit bi et triphasé). On peut le comparer à un choc responsable d'accéléérations comparables à celles observées lors d'un tremblement de terre.

2. Etat de la question

Depuis longtemps le calcul des efforts électrodynamiques dans les conducteurs souples est l'objet de recherches attentives, et tout récemment ont été mis au point des logiciels évolués qui sont consacrés à l'étude de faisceaux de conducteurs. Les logiciels utilisés par le groupe de travail 23.02 de la CIGRE, plusieurs groupes de chercheurs ont adaptés des logiciels "éléments finis" (SAMCEF 1, 2, ADYNA, NONSAP 3, etc...) à ce type de calcul.

Au départ, ces logiciels s'intéressaient aux efforts entre phases, chaque phase était constituée d'un seul conducteur, au besoin un conducteur équivalent remplacé par plusieurs bureaux d'études européens (Belgique, France, Allemagne, Pays-Bas, Pologne). Les résultats, malgré la grande complexité des modèles non-linéaires dont ils sont issus, adhérent parfaitement aux essais en vraies grandeurs.

Dans le cas des faisceaux de conducteurs il a été prouvé notamment lors du symposium CIGRE de Bruxelles (1985) que les effets entre phases et les effets au sein du

est à notre sens plus riche que l'étude expérimentale si le modèle est suffisamment proche de la réalité. En effet, l'analyse des phénomènes instantanés (tension, déplacement, vitesse, accélération, forces appliquées) permet des comparaisons, superpositions, etc... qui rendent très aisée la compréhension physique d'un phénomène encore mal connu. Par ailleurs, la complexification de la structure peut être introduite sans difficulté et une étude paramétrique est dès lors possible.

Un soin tout particulier a donc été apporté au choix d'un modèle bien adapté à l'étude du contact. Ce modèle a été validé par plusieurs confrontations expérimentales. Une formulation simplifiée originale est proposée au lecteur, elle est basée sur notre étude paramétrique.

Ces divers points seront examinés dans notre publication.

À partir du centre de la sous-portée la distance sur laquelle les conducteurs sont en contact augmente (contacts successifs repérés sur la fig. 2) et la tension atteint sa valeur maximale quand l'écrasement du faisceau est maximal (vers 0,18 s), c'est-à-dire

Après 115 ms un premier contact apparaît (le déplacement (fig. 2) est limité au demi-intervalle entre sous-conducteurs, moins le diamètre), aussitôt les vitesses et les accélérations des noeuds en contact se fixent à leurs valeurs moyennes (dans notre exemple, la réaction de contact apparaît (fig. 5) et la courbe de compression dans l'entrecroisement continue à croître avec une discontinuité de la dérivée.

Au début du phénomène, les sous-conducteurs se rapprochent rapidement (fig. 2), l'accélération (fig. 3) suit bien entendu la force appliquée (fig. 1). La compression dans l'entrecroisement a un taux d'accroissement de 9000 N/s. La tension dans le conducteur après un léger effet inertiel (60 ms) s'accroît à un taux de 32000 N/s.

La force électrodynamique (fig. 1) est tout autant influencée par les déplacements (fig. 2) que par l'évolution du courant.

Les figures 1 à 7 permettent d'illustrer le comportement du faisceau lors de l'apparition du court-circuit. On a volontairement, pour les figures 1 à 6, limité le temps d'observation à 0,2s pour mieux suivre le transitoire du phénomène.

4. Interprétation physique du phénomène

Une méthode d'intégration temporelle implémentée est utilisée, la raideur et les forces électrodynamiques sont remises à jour à chaque itération au sein d'un pas de temps. Le pas de temps est calculé par le programme de manière à imposer un contact sans croisement. Le signe de la réaction de contact est mis en mémoire et son changement indique une séparation des noeuds en cause.

Tout le problème consiste à prendre en compte l'éventuel contact (et la séparation) entre deux câbles. La méthode consiste essentiellement à discrétiser la structure d'une manière appropriée et symétrique sur chacun des sous-conducteurs. Entre chaque noeud opposés on introduit des entrées fictives. Ces dernières n'ont ni masse ni raideur. Elles permettent d'imposer une contrainte aux déplacements des noeuds dès que la longueur de cette entrecroisement fictive devient égale au diamètre d'un sous-conducteur. La contrainte (obtenue par la technique des multiplicateurs de Lagrange) est alors l'image de la réaction de contact. Dès l'activation de cette contrainte, on modifie les conditions initiales sur la vitesse et les accélérations des noeuds dans l'hypothèse d'un contact parfaitement mou.

3. Modélisation du contact

La prise en compte du phénomène de contact n'est pas chose facile. Nous avons tenté de résoudre ce problème dans le cadre du SAMCEF développé à l'Université de Liège.

Le faisceau pouvait être superposés. Les logiciels cités plus haut conservent donc tout leur intérêt, mais une partie du phénomène était masquée.

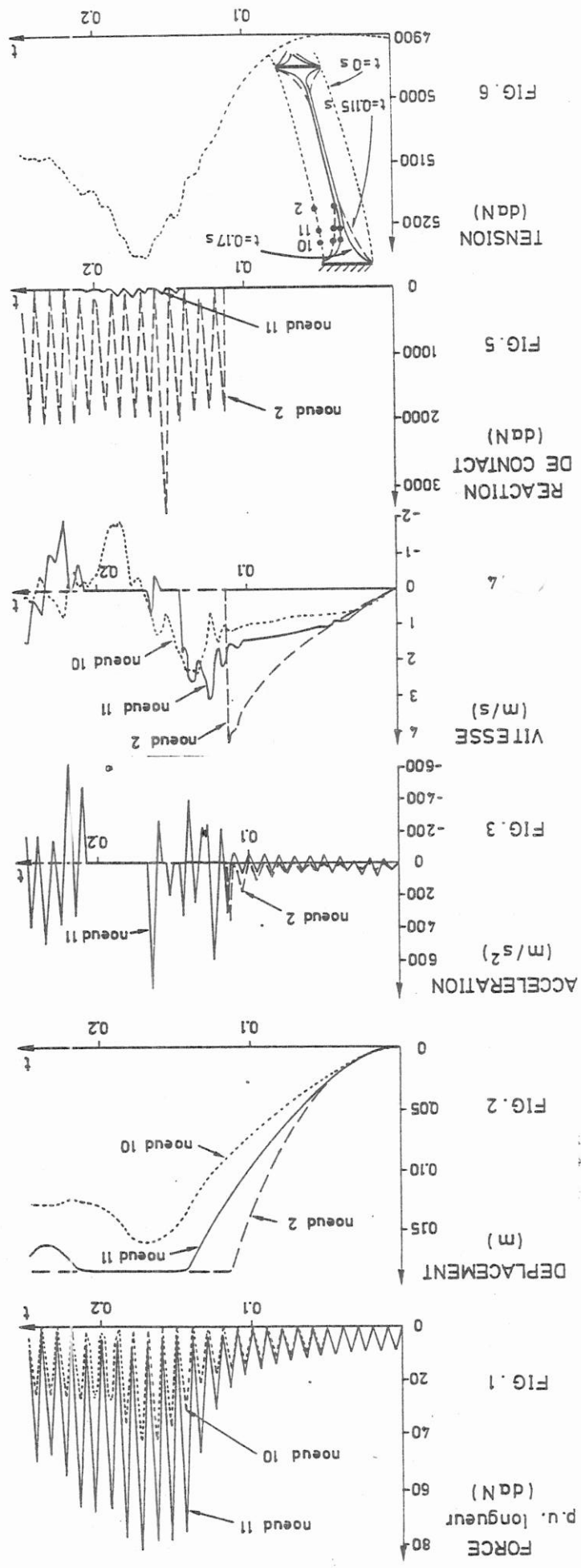


FIG. 6

FIG. 5

FIG. 4

FIG. 3

FIG. 2

FIG. 1

Les données sont accessibles dans la référence 7, pour un faisceau horizontal de deux conducteurs type "Curlaw" (masse 1,98 kg/m, section 592 mm²), espace de 40 cm, une longueur de portée de 135 m divisée en deux sous-portées identiques par une entre-croisée rigide. Le court-circuit est symétrique avec une intensité de 19 kA pour le faisceau, durée 0,475 s. La tension initiale est de 49050 N par sous-conducteur.

Il faut se garder de généraliser les résultats obtenus à d'autres configurations, l'étude présentée ci-après (chap. 6) en persuadera les lecteurs.

Des essais de court-circuit sur des conducteurs en faisceau sont délicats. Quelques publications en font état 4,5,6,7,8,9. Malheureusement les conditions expérimentales sont rarement décrites avec suffisamment de détails et les résultats eux-mêmes très avec parcimonie. Le phénomène est parfois masqué par un écartement entre sous-conducteurs très réduit (deux fois le diamètre), etc... Nous avons analysé le cas traité par 7, il est très significatif. Par ailleurs, toutes les conditions de l'essai sont clairement exposées.

5. Confrontation expérimentale

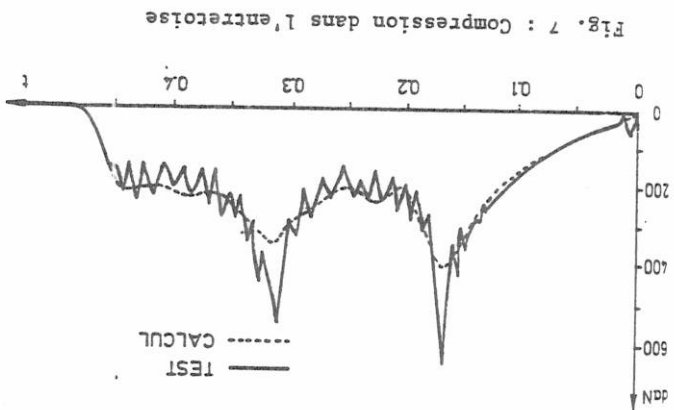


Fig. 7 : Compression dans l'entretoise

Quand les forces électrodynamiques sont compensées par les forces élastiques (liées à la tension) et les forces d'inertie. Il en résulte des oscillations résiduelles dues aux variations des forces électrodynamiques (100Hz) et des forces d'inertie. Dans ce laps de temps certains nœuds proches de l'extrémité de portée se séparent (disparition de la réaction de contact et modification des déplacements, vitesse, accélération). A la fin du court-circuit, toutes les contraintes restantes sont relâchées et le câble poursuit son évolution en fonction de l'équilibre instantané entre les forces de gravité, les forces d'inertie et les forces élastiques. Dans l'exemple présenté, la contribution des autres phases n'a pas été prise en compte. Cet effet est à superposer. En général les puissances de court-circuit actuelles et les faibles durées de court-circuit font que le phénomène de pincement décrit ci-dessus est généralement terminé avant même que les effets entre phases n'aient commencé à influencer le mouvement, sauf bien entendu en cas de réenclenchement sur défaut.

La fig. 7 confronte nos calculs aux résultats publiés dans les discussions de l'article 7. La confrontation n'est possible que sur la seule courbe disponible, c'est-à-dire la compression de l'entretoise. La valeur de crête instantanée est légèrement sous-évaluée, cet écart peut être lié à une approximation sur l'angle de projection de l'effort sur l'entretoise (du fait d'une discrétisation par des éléments linéaires). Le respect de la valeur moyenne de l'effort qui est dimensionnée, couplée à la simultanéité de l'évolution instantanée présage d'une possibilité de dimensionnement adéquat des structures d'ancrage. Une information plus complète est accessible sur les figures 1 à 6 obtenues par le calcul. Notamment la tension dans chaque sous-conducteur (fig. 6), quasi identique à l'effort appliqué aux ancrages. La flèche initiale de 0,8 m est réduite de 4 cm par l'effet du pincement. Compte tenu de l'essai (monophasé) il n'y a pas d'effet entre phases. Le cas testé correspond à une surtension mécanique très faible (8%) pendant le pincement (voir chap. 6) dû à un faible F_2 et un grand F_3 . Certains cas pratiques peuvent conduire à des accroissements de plusieurs centaines de pour cent de la tension, généralement dans des configurations de postes.

6. Etude paramétrique

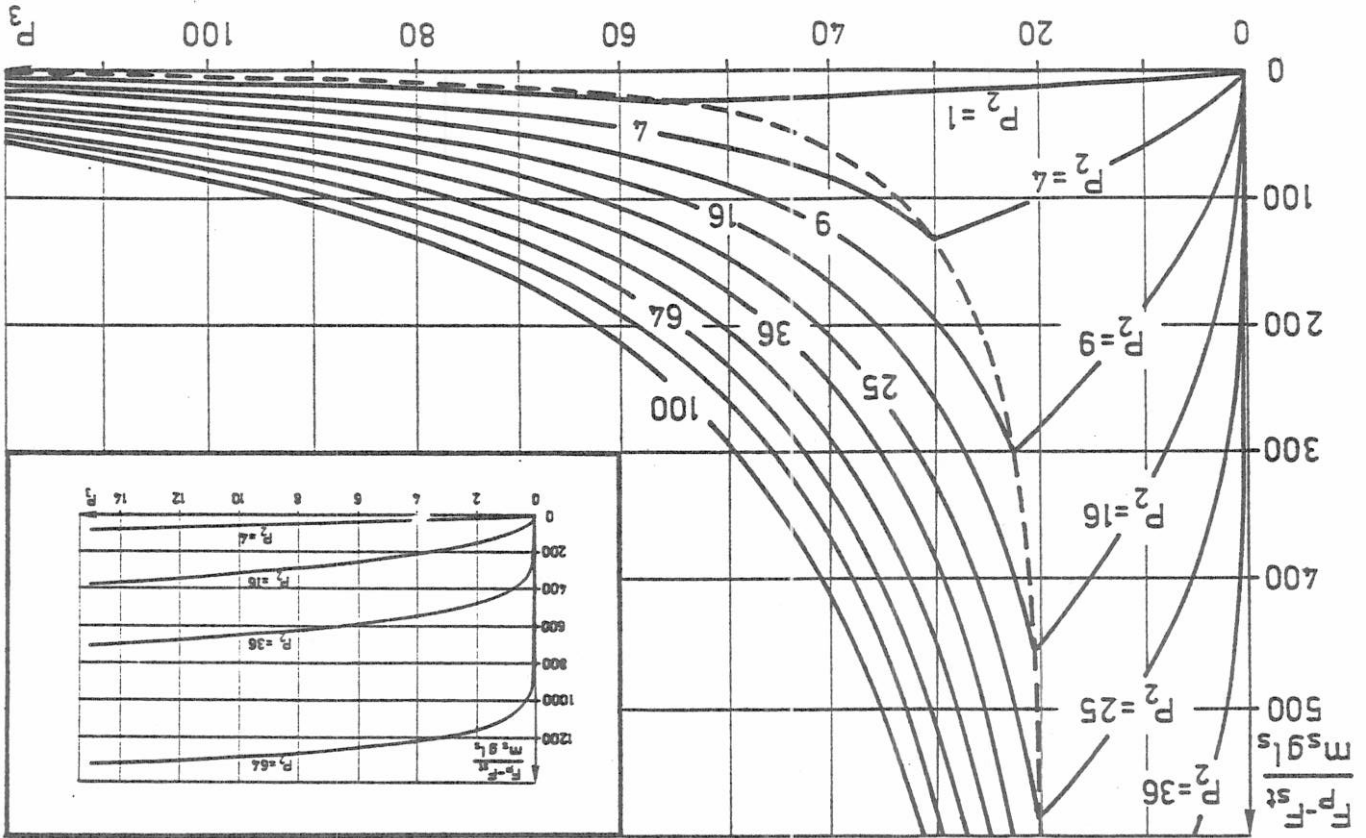
Le phénomène de pincement dans les faisceaux de conducteurs dépend de très nombreuses grandeurs physiques. Nous en avons répertorié 18 :

- intensité efficace de court-circuit
- constante de temps de la composante unidirectionnelle
- degré d'asymétrie
- durée du court-circuit
- réenclenchement sur défaut
- distance entre phases
- longueur de sous-portée
- nombre d'entretoises par portée
- nombre de sous-conducteurs par phase
- échauffement
- section de sous-conducteur
- module de Young du conducteur
- diamètre du sous-conducteur
- masse du sous-conducteur
- raideur "dynamique" équivalente de l'ancrage de sous-portée; le mouvement des ancrages dépend de la raideur "dynamique" équivalente de l'ancrage de sous-portée; la mise en évidence d'un nombre très limité de quantités adimensionnelles qui régissent le phénomène est un des principaux attraits de cette étude. Elle fera ressortir naturellement les interactions recherchées. On en déduira les orientations nécessaires pour la conception des faisceaux.

Nous nous limiterons à la détermination du premier pic de tension lors de l'écrasement maximal du faisceau. Nous pouvons négliger l'influence :

- de la durée du court-circuit : temps de contact très souvent inférieur à la durée du court-circuit.

Fig. 8 Contraintes relatives dans le câble en fonction de P_2 et P_3



La racine carrée de l'expression (6) développée au premier ordre fait apparaître la quantité sans dimension :

$$\frac{F_{-R}}{P_{-R}} \frac{P_{-R}}{m_s g l_s} \text{ proportionnel à } \sqrt{P_2} \quad (8)$$

que : d'autre part l'accroissement relatif de tension (F_{-R}^{st}) est proportionnel au courant comme l'avait déjà mentionné Mme Manuzio. En supposant sur cette base

$$1 = I_s \cdot \left(1 + \frac{P_{-R}}{EA} \right) \quad (7)$$

par la théorie de l'élasticité : (on a supposé une allure triangulaire, les derniers termes correspondent au mouvement des ancrages).

$$1 = \sqrt{1 + \frac{S}{2} + (d_s - \emptyset)^2} - 2 \cdot \frac{S}{P_{-R}} - 2 \cdot \frac{S}{P_{-R}} \quad (6)$$

par voie géométrique : Le troisième fait intervenir la réaction structurale aux efforts appliqués. La tension mécanique maximale a lieu lors de l'écrasement du faisceau. À cet instant et en toute première approximation peut exprimer la longueur déformée d'un sous-conducteur de deux manières différentes :

La force de Laplace et la gravité. Une autre interprétation en serait l'accélération relative créée par l'apparition du court-circuit ($F_{os} = m_s \cdot \text{accélération}$).

$$P_2 = \frac{F_{os}}{m_s g} \quad (5)$$

Force électromagnétique appliquée par unité de longueur : (notations en annexe)

$$F_{os} = \frac{d_s}{0.2 \cdot I^2 \sqrt{n-1}} \quad (2)$$

$$\text{ou } d_s = \frac{a_s}{\sin \frac{\pi}{n}} \quad (3)$$

La gravité : $m_s g$ (4)

Le second est représentatif de la charge appliquée par unité de longueur : (notations en annexe)

$$P_1 = w t \quad (1)$$

où w est la pulsation du courant

6.1 Les paramètres

Le premier est lié à la constante de temps de la composante unidirectionnelle. Cette valeur n'a d'influence que si le courant présente une asymétrie qui sera maximale lorsque l'instant du défaut coïncide avec le passage à zéro de la tension. L'étude qui suit est basée sur un défaut symétrique, nous donnerons en fin de parcours les coefficients correctifs à appliquer en cas d'asymétrie maximale.

des autres phases : le phénomène du pincement peut se superposer aux effets entre phases qui sont de fréquence beaucoup plus basses.

de l'échauffement : l'accroissement de température du conducteur avant le premier pic de tension est négligeable. En effet ce dernier a lieu en général dans les 100 premières millisecondes, souvent entre 5 et 40 ms dès que le courant dépasse 40 kA.

C'est au voisinage de cette frontière qu'apparaissent les efforts les plus importants car l'énergie électromagnétique y est maximale. Ces efforts deviennent prohibitifs au delà de $P_3 = 15$. D'où l'attention toute particulière à prendre durant la conception pour éviter d'atteindre cette zone lors d'un court-circuit.

Les connexions courtes ("Jumper") correspondent au limiter P_3 . C'est le contraire dans les configurations postes et lignes.

Pour chaque cas étudié, nous avons relevé le temps de contact. Il est remarquable de constater qu'il peut se déduire de la formule très simple :

La ligne en pointillé de la fig. 8 présente deux asymptotes. Une asymptote horizontale (à peine visible), qui correspond à une impossibilité de contact pour des courants très faibles (surcharges p.e.)¹⁰. Une asymptote verticale vers $P_3 = 20$, valeur en deçà de laquelle il n'est pas possible de provoquer le contact quel que soit le courant.

Il existe deux zones fondamentalement distinctes : sans contact (à gauche de la ligne en pointillé) et avec contact. L'influence d'une augmentation de P_3 a un effet opposé dans chaque zone : augmentation sans perte des contraintes en cas de non contact, décroissance très marquée s'il y a contact. En pratique les valeurs habituelles de P_3 sont les suivantes :

"Jumper" 0.5...10...20...100...200...400
 "postes" "lignes"

Toutes les conclusions présentées ci-après et résumées sur la figure 8 sont déduites de nombreux calculs effectués par la méthode numérique proposée plus haut.

Grâce à la paramétrisation on peut espérer que ces courbes soient indépendantes d'un cas particulier (ce que nous avons bien sûr vérifié). Pour mémoire ces courbes font référence à un défaut sans asymétrie, cette dernière sera traitée ultérieurement.

L'étude paramétrique

En effet la tension initiale (R_{st}) est de peu d'influence sur l'accroissement relatif de la contrainte.

La contrainte maximale (R^p) est rendue adimensionnelle par le choix naturel :

$$P_3 = 200 \cdot \sqrt{\frac{m^2 g l^2 (\sin \frac{\pi}{n})^2}{2} \cdot \left(\frac{EA}{l_s} + \frac{S^d}{2} + \frac{z}{2} \right)} \quad (10)$$

De manière à recouvrir plus clairement les zones d'utilisation habituelles, nous avons finalement opté pour le paramètre suivant :

$$p = \frac{m^2 g l^2}{2} (d_g - \emptyset)^2 \cdot \left(\frac{EA}{l_s} + \frac{S^d}{2} + \frac{z}{2} \right) \quad (9)$$

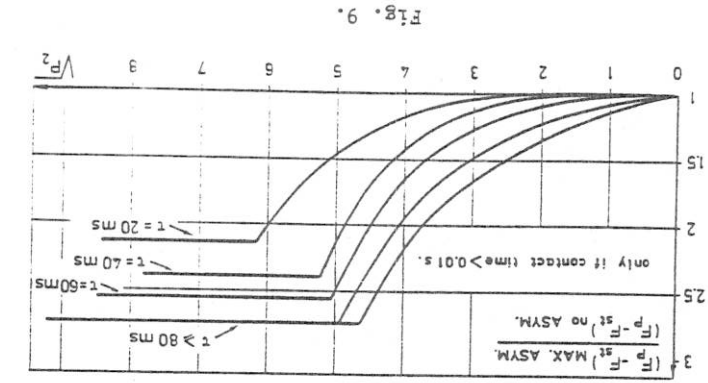


Fig. 9.

- Influence de l'asymétrie et de la constante de temps : La figure 9 reprend l'influence de la constante de temps d'amortissement de la composante unidirectionnelle, en cas d'asymétrie maximale.

- Les raidisseurs d'ancrages longitudinaux (S^d) et transversales (S^z) n'interviennent que lorsque leurs valeurs sont proches de la rigidité extensionnelle du câble (EA/l_s), fondamentalement dépendante de la section des conducteurs et de la longueur des sous-portées.

$$\frac{R^p}{P} \frac{p-st}{m^2 g l^2} = 1.1 \cdot P_2 \cdot P_3 \quad (14)$$

$$\text{ou } B = \frac{1+0.003 P_2}{0.76} \cdot 1.92 \quad (14')$$

- En résumé on utilisera toujours la plus petite valeur de (P_3) ou (14). Si elle est associée à (13) il y a contact, dans le cas inverse le contact ne se produit pas.

$$\frac{R^p}{P} \frac{p-st}{m^2 g l^2} = \alpha \cdot \sqrt{P_2} \quad (13)$$

$$\text{ou } \alpha = -2.68 + \frac{P_3}{11886} \cdot 1.512 \quad (13')$$

- En l'absence de contact la proportionnalité par rapport à $\sqrt{P_2}$ disparaît, on utilisera la relation :

La simultanéité d'un pic de force électromagnétique (toutes les 10 ms) avec le temps de contact accroît la contrainte maximale.

Un contact se produit à un instant total-ment indépendant de la longueur de la sous-portée, de la tension initiale, des caractéristiques d'ancrages et de l'élasticité des conducteurs.

(t_c en s, a_s en m). La correction à apporter en cas d'asymétrie sera donnée plus loin.

$$t_c = 0.29 \sqrt{\frac{a_s - \emptyset}{P_2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}} \quad (12)$$

[3] Miti A.M., Heinrich C., "Berechnung des Bewegungsa-
blaus und des dynamischen Zugkraftverlaufs von Gebun-
delten Seilsummeltschienen im Kurzschlussfall", Elektrizi-
tion et l'Energie (IEEE serv. cen.), cat. 80, CE 1583-
4, pp. 192-195, Montréal, octobre 1980.

[2] Lillien J.L., Gérardin M., Piroette P., "Sollicita-
tions électrodynamiques dans les postes lors de défauts"
présenté à la Conférence Canadienne sur les Communica-
tions et l'Energie (IEEE serv. cen.), cat. 80, CE 1583-
4, pp. 192-195, Montréal, octobre 1980.

[1] Lehmann W., Lillien J.L., Orkisz J., "Les conséquen-
ces mécaniques des courants de court-circuit dans les
postes haute tension à conducteurs flexibles. Méthodes
numériques - Approche informatique" présentée à la ses-
sion CIGRE, rapport 23-08, Paris, septembre 1982.

8. Références

De plus, la méthode numérique proposée permet de prédéterminer avec une précision remarquable toute l'évolution temporelle du phénomène. C'est d'une importance capitale pour le calcul des structures sup-
port qui doivent subir ces contraintes dynamiques à hau-
te fréquence. En effet, un calcul statique basé sur les
valeurs maximales conduirait à un surdimensionnement ex-
cessif.

Enfin sont présentes des règles de dimen-
sionnement.

La fiabilité de notre modèle nous a per-
mis de mener une étude paramétrique dont sont déduites
trois valeurs sans dimensions qui, à elles seules, con-
ditionnent le phénomène.

Une méthode simplifiée très sûre donne
rapidement accès à la valeur maximale de la tension mé-
canique dans un faisceau de conducteurs.

7. Conclusions

Nous avons présentée une méthode numérique
fiable pour l'étude du phénomène de pincement dans les
faisceaux de conducteurs parcourus par des courants de
court-circuit.

L'affinement du modèle est garanti par
l'excellente cohérence entre les prédéterminations numé-
riques et les résultats d'essais.

Cette méthode nous a permis de saisir la
physique du contact dans toute sa complexité et en par-
ticulier d'éclaircir les phénomènes transitoires qui en-
cadrent l'instant du contact.

$$P_1' = P_2 \cdot (1 + e^{-\frac{t}{0.02}}) \quad (15)$$

On en déduira le facteur correctif à ap-
pliquer aux contraintes calculées par les formules pré-
cédentes (13) et (14). Ce facteur n'est à appliquer que
pour autant que le temps de contact soit supérieur à 10
ms, sinon le contact a lieu avant le premier pic de la
force et n'est donc pas influencé par ce dernier.

Une augmentation très sensible (jusqu'à
250%) des contraintes maximales peut avoir lieu dans les
zones où la constante de temps atteint 80 ms.

Le temps de contact est encore donné par la
la formule (12) à condition de remplacer P2 par

$$F_{st} = (-2.68 + \frac{11886}{1.512} \times \sqrt{2.3}) \times 10^{-6} = 2.3$$

$$P_3 = 200 \sqrt[3]{\frac{19.8 \times (130/2)^3}{(0.4 - 0.032) \times 7.10 \times 10^5 \times 59210^{-6}}} = 192$$

$$P_2 = 0.2 \frac{(19/2)^2}{0.4} / 19.8 = \frac{19.8}{45} = 2.3$$

Annexe : exemple de calcul

- A : section d'un sous-conducteur (m)
- a₁ : distance entre deux sous-conducteurs (s-c) (m)
- a₂ : diamètre du faisceau (= a₁ si n=2) (m)
- E_s : module de Young du conducteur (N/m²)
- F₀ : force électrodynamique linéique par s-c (N/m)
- F_{0s} : valeur de crête de la tens. lors du pincement (N)
- F_{at} : valeur de la tension initiale par s-c (N)
- g : accélération de la gravité = 9.81 (m/s²)
- I : valeur efficace du courant de c.c. (kA)
- l : longueur de la sous-portée (m)
- m_s : masse d'un s-c. p.u. de longueur (Kg/L)
- n₁ : nombre de s-c. dans le faisceau adimensionnels
- n₂ : paramètres adimensionnels
- S₁ : raideur "dynamique" équivalente longitud. (N/m)
- S₂ : raideur des entretoises à la compression (N/m)
- T_c : instant du premier contact (s)
- T_k : durée du court-circuit (s)
- Ø : diamètre d'un sous-conducteur (m)
- t : const. de temps de la comp. unidirect. du ct (s)
- w : pulsation du courant (314 rad/s à 50 Hz) (rad/s)

Annexe : notations utilisées (suivant CEI)

[10] Adami H., Leppers P.H., Lillien J.L., "Le comporte-
ment des faisceaux découplés aux surintensités. Résul-
tats expérimentaux et calculs théoriques" Electra n°90,
pp.23-42, 1983.

[9] Adami H., Vos C.W.M., "Short-circuit tests and mea-
surement of mechanical stresses on full-scale sections
of 420 kV outdoor substations" présentée au Symposium
CIGRE sur les courants de forte intensité dans les ré-
seaux, rapport 330-03, symposium 06-85, Bruxelles, 3-5
juin 1985.

[8] Miodziawski A., "Analiza dynamiczna przetoczo-
niego ukladu konstrukcyjnego stacji rozdzielczych przy
dzialaniu pradow zwarciowych" Thèse de doctorat présen-
tée à l'Université Polytechnique de Cracovie (prof. Z.
Maszczyzyn) en 1981.

[7] Manuzio G., "An investigation of forces on bundle
conductor spacers under fault conditions" IEEE trans
on PAS, vol. 86, n° 2, pp. 166-184, 1967.

[6] Stein N., Herrmann B., "Kurzschlusselzuge in
schaltanlagen" "Elektrizitätswirtschaft, Jg 78(79) heft
6, pp. 179-186, 1979.

[5] Craig D.B., Ford G.L., "The response of strain bus
to short circuit currents" IEEE trans on PAS, vol. 99,
pp. 434-442, septembre 1979.

[4] Landin I., Lindqvist C.I., Bergstrom L.R., Cullen
G.R., "Mechanical effects of high short-circuit currents
in substations" IEEE trans. on PAS, vol. 94, pp. 1657-
1665, 1974.

zitätswirtschaft, Jg 82(1983), heft 9, pp. 318-325,
1983.

F_p = 49050 + 2.3 * (19.8 * 130 / 2) = 52020 N
comparable à la valeur maximale de la fig. 6.