

## Chapitre 5

### UNE METHODE SIMPLIFIEE ET L'ETUDE PARAMETRIQUE

#### 5.1. POSITION DU PROBLEME [173-181]

Le comportement non linéaire des conducteurs souples est un problème complexe vu le nombre de paramètres en jeu et la non linéarité du phénomène (décrite au chapitre 2).

Par la force des choses, certaines méthodes simplifiées ou empiriques ont été proposées, notamment les normes allemandes V.D.E. [181]. D'autres plus spécifiques [175-176] sont relatives à la détermination des débattements maxima des câbles et donc des distances d'isolement dans l'air [173]. MANUZIO [180] détermine les contraintes dans les entretoises des faisceaux de conducteurs. CRAIG et FORD [174] se proposent d'étudier les faisceaux sur base d'un bilan d'énergie; nous avons par ailleurs repris et développé cette méthode [Annexe 2].

Le présent chapitre sera consacré uniquement au comportement des jeux de barres souples à conducteur unique par phase, qui demeure le thème majeur de notre étude. Nous aborderons le problème par la méthode du pendule à deux degrés de liberté suggérée d'abord par CRAIG [174]

Elle nous est apparue comme étant la méthode la plus appropriée à développer en vue d'obtenir sur une base simple une étude temporelle du phénomène, qui permettrait l'évaluation des tensions et des déplacements. Ce calcul prend en compte notamment l'élasticité du câble, son échauffement et la variation des forces avec les déplacements. La raideur des structures supports est également introduite dans le modèle [178].

Récemment, LUONGO [179] a proposé une étude similaire sur le plan formel, mais plus générale quant aux hypothèses.

#### 5.2. THEORIE DU PENDULE A DEUX DEGRES DE LIBERTE

##### 5.2.1. Hypothèses

5.2.1.1. Le conducteur est supposé se déplacer dans un plan pivotant autour de la droite qui joint les points d'ancrage, droite jouant le rôle de charnière (figure 1). La forme de la figure d'équilibre est supposée parabolique pendant tout le mouvement et la portée de niveau. On néglige les déplacements longitudinaux (selon la direction X).

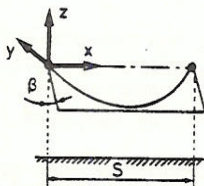


Figure 1

Hypothèse sur l'allure instantanée du câble dans le modèle pendule.

Remarque : Cette hypothèse est évidemment restrictive puisque le mouvement réel du câble est gauche et sa déformée ressemble peu à une parabole une fois dépassé le point de chute. (Point B à la fig. 2) et surtout après le premier coup de fouet (point C à la fig. 2).

De plus, la présence de dérivations gênera le mouvement. Néanmoins, la confrontation des résultats obtenus par une méthode rigoureuse et cette méthode approchée montrent que cette dernière permet d'obtenir les valeurs des tensions mécaniques et écartements valables au point A ("premier écart" fig. 2) et au point B ("point de chute"), compte tenu du respect de l'hypothèse dans cette première partie du mouvement.

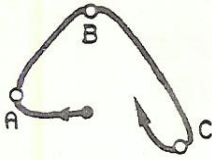


Figure 2  
Allure générale du mouvement du câble à mi-portée dans le plan YZ à la fig. 1.

- A "premier écart"
- B "premier point de chute" (vitesse et tension mécanique quasi nulles)
- C "coup de fouet"

Dès lors, les tensions mécaniques lors du coup de fouet (en C) seront valables compte tenu de la transformation en énergie cinétique et de déformation de l'énergie potentielle disponible au point de chute (en B). Après le premier coup de fouet, on ne peut plus se fier au modèle d'une manière rigoureuse mais cette première approche sur les instants fondamentaux du mouvement permettra une évaluation simple et plus précise que celles obtenues par d'autres méthodes approximatives qui ne peuvent pas prendre en compte tous les paramètres que nous allons examiner.

Il faut noter que le modèle pourrait très bien s'adapter à une autre géométrie initiale. LUONGO [179] propose une formulation générale.

Grâce à cette hypothèse, on peut ne considérer que le mouvement du point bas de la portée puisque les autres coordonnées découlent de l'équation parabolique. Nous concentrerons la masse au centre de gravité de la parabole soit au  $2/3$  de la flèche à mi-portée et nous lui appliquerons les forces intégrées sur l'ensemble du câble.

5.2.1.2. La force électromagnétique (cas biphasé) sera supposée égale à celle créée par deux conducteurs droits, de longueurs égales à celles parcourues par le courant, parallèles passant par le centre de gravité de la portée et séparés d'une distance  $b$  variable dans le temps. " $b$ " vaut la distance entre phases, augmentée du double du débattement relatif. (il y a antisymétrie du mouvement des deux câbles). La force est supposée uniformément répartie.

*Remarque* : Il est évident qu'il n'y a aucune difficulté à généraliser le cas à d'autres types de défauts (triphase par exemple). Nous négligeons l'effet d'"action propre" du câble qui est de toute façon négligeable avec les flèches habituellement rencontrées. L'effet du non parallélisme des deux droites se caractérisera par un facteur multiplicatif légèrement supérieur à l'unité, mais compte tenu des distances entre phases, la simplicité du modèle ne justifie pas le choix d'une valeur plus précise. Ce ne sera pas le cas au chapitre 7 où nous nous libérerons de cette hypothèse.

5.2.1.3. Nous choisissons comme position initiale les valeurs correspondant à la position de référence définie antérieurement. C'est-à-dire que nous considérons la position déformée du câble comme valeur initiale alors que dans le modèle mathématique décrit au chapitre 2 nous considérons la position non déformée.

La mesure de JAUMANN de la déformation sera utilisée plutôt que la mesure de GREEN. Ce choix est libre et n'est en aucun cas imposé par le modèle. LUONGO [179] par exemple considère la mesure de GREEN.

*Remarque* : Le choix de la position initiale déformée néglige l'effet de la déformation initiale des ancrages et nécessite l'introduction d'une précontrainte égale à la valeur initiale de la tension dans le câble.

Nous pouvons ainsi nous affranchir d'un calcul de position de référence, ce qui facilite le traitement. Concernant les mesures de

déformation, rappelons (i) que l'on peut appliquer indifféremment GREEN ou JAUMANN lorsque les déformations restent infinitésimales et que la seule non linéarité provient des rotations finies. Dans notre cas, les déformations restent faibles (quelques centimètres par rapport à plusieurs dizaines de mètres) aussi l'approximation utilisée est justifiable dans un modèle simplifié. De plus, ce choix particulier conduira à une interprétation physique directe des différents termes des équations. Pour rappel, la mesure de JAUMANN s'écrit dans notre cas

$$\epsilon_J = \frac{ds - ds_0}{ds_0}$$

5.4.1.4. Nous négligeons les amortissements. La discussion à ce propos est détaillée au chapitre 2; paragraphe 2.1.

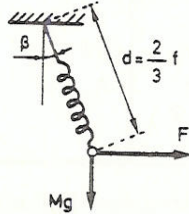


Figure 3  
Le pendule à deux degrés de liberté ( $d$  et  $\beta$ )

### 5.2.2. Théorie

Nous exposerons la mise en équations du modèle dans le cas d'un court-circuit biphasé, configuration en nappe. Les autres configurations ne présenteront aucune complication supplémentaire lors de la mise en équations. Les deux degrés de liberté du modèle sont  $d$  (ou  $f$ ) et  $\beta$ , coordonnées polaires du centre de gravité de la portée définies par rapport à l'axe joignant les points d'ancrage.

5.2.2.1. Notations.- Nous utiliserons les notations suivantes :

Symboles	Signification	Unité
$f$	flèche à mi-portée ( $f_0$ valeur initiale)	m
$S$	longueur de la portée ( $S_F$ longueur parcourue par du courant)	m
$T$	la tension dans le câble ( $T_0$ valeur initiale)	N
$Mg$	pois total du câble ( $mg$ le poids par unité de longueur)	N
$F$	forces appliquées	N
$a$	distance entre phases	m
$d$	position instantanée du centre de gravité	m

(i) G. SANDER. Notes du cours de Théorie des Structures. Université de Liège, Laboratoire d'Aéronautique, rapport SF-77. Oct. 1978, Ch. 7 p.25

EA	produit du module d'élasticité par la section du conducteur (rigidité extensionnelle)	N
K	raideurs des deux supports mis en série. Soit $K = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$	N/m
$\theta$	température du câble ( $\theta_0$ valeur initiale)	°C
$\beta$	angle de déviation par rapport à la verticale ( $\beta_0$ valeur initiale)	rad
$\rho$	masse volumique du câble	Kg/m <sup>3</sup>
$I_{eff}, \phi, \omega, \tau$	caractéristiques du courant de court-circuit (voir ch. 2, paragraphe 3)	A, rad, s <sup>-1</sup> , s

5.2.2.2. Définitions des relations de base.- La longueur instantanée de la parabole peut s'exprimer par

$$\ell = S + \frac{8}{3} \frac{f^2}{S} - \frac{T}{K} \quad (3)$$

où  $S - \frac{T}{K}$  représente la portée instantanée, cette correction est omise au dénominateur du deuxième terme car elle aurait un effet de second ordre sur  $\ell$ .

Par ailleurs, compte tenu des hypothèses, la densité d'énergie libre peut s'écrire :

$$T_0 \varepsilon + \frac{1}{2} \varepsilon^2 EA - \alpha EA \Delta \theta \varepsilon \quad (4)$$

où  $\varepsilon = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0}$ . Effectuant la variation par rapport à la déformation, on trouve l'effet normal dans le câble [ $\ell$  et  $\ell_0$  sont tirés de la relation (3)], après quelques calculs, on obtient :

$$T \cdot \left(1 + \frac{EA}{K\ell_0}\right) = T_0 - \alpha EA \Delta \theta + \frac{EA}{\ell_0} \left[ \frac{8}{3S} (f^2 - f_0^2) + \frac{T_0}{K} \right] \quad (5)$$

On aurait pu obtenir la même relation en écrivant, compte tenu des hypothèses, la longueur instantanée du câble, tenant compte de la valeur initiale, de l'élasticité du câble et de l'accroissement de température :

$$\ell = \ell_0 \left[ 1 + \frac{T - T_0}{EA} + \alpha (\theta - \theta_0) \right] \quad (5')$$

Cette relation, groupée avec la relation 3, permettrait d'obtenir également la relation 5.

La force électromagnétique, vu l'hypothèse 5.2.1.2., se met sous la forme (force intégrée sur la partie de la portée parcourue par le courant appelée  $S_F$ )

$$F = \frac{0,2 \cdot 10^{-6} i^2}{b} \left[ \sqrt{S_F^2 + b^2} - b \right] \quad (6)$$

avec

$$b = a[1 - 2 \sin(\beta - \beta_0)] \quad (7)$$

et

$$i(t) = \sqrt{2} I_{\text{eff}} \cdot [\sin(\omega t + \phi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \phi] \quad (8)$$

5.2.2.3. Equations du mouvement.- Les énergies potentielle, cinétique et de déformation du pendule peuvent s'écrire :

$$\text{énergie de déformation : } U_1 = U_1^0 + T_0(\ell - \ell_0) + \frac{1}{2} EA \frac{(\ell - \ell_0)^2}{\ell_0} - \alpha EA \Delta \theta (\ell - \ell_0) \quad (9)$$

$$\text{énergie potentielle : } U_2 = U_2^0 + Mg(d_0 - d \cos \beta) \quad (10)$$

$$\text{énergie cinétique : } T = \frac{1}{2} M (d^2 \dot{\beta}^2 + \dot{d}^2) \quad (11)$$

$U_1^0$  et  $U_2^0$  sont les valeurs à l'état initial, l'expression de  $U_1$  se déduit de l'intégration de la relation (4) sur la longueur du câble. Exprimant le lagrangien du système :

$$L = T - (U_1 + U_2) \quad (12)$$

les équations du mouvement se déduisent des équations de LAGRANGE (annexe 5).

Il vient après quelques calculs :

$$\ddot{f} = f \cdot \dot{\beta}^2 + \frac{3}{2} g \cos \beta - \frac{12fT}{MS} - \frac{3F}{2M} \sin \beta \quad (13)$$

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{f} \cdot (-2f \cdot \dot{\beta} - \frac{3}{2} g \sin \beta - \frac{3F}{2M} \cos \beta) \quad (14)$$

équations dans lesquelles  $T$  est relié à  $f$  par la relation 5 à condition de connaître les données  $EA$ ,  $K$ ,  $S$ ,  $T_0$ ,  $f_0$ ,  $\alpha$ ,  $\theta_0$  et la loi d'échauffement que nous considérons, en première approximation linéaire (échauffement adiabatique pur, annexe 1).  $F$  est la force électromagnétique définie par les relations 6 à 8. Il n'y a aucune difficulté à ajouter d'autres types de forces dans le modèle, par exemple le vent s'introduirait comme la gravité mais en direction horizontale et selon son sens, ce qui donnerait :

$$\text{une contribution à l'équation 13 : } + \frac{3h}{2M} \sin \beta \quad (13')$$

$$\text{et une contribution à l'équation 14 : } + \frac{3h}{2M} \cos \beta \quad (14')$$

( $h$  est la résultante de la force du vent appliquée en sens opposé à  $F$ ).

Les équations du mouvement (13 et 14 avec les compléments 13' et 14') sont à résoudre avec les conditions initiales suivantes : (résolution de la partie statique des équations)

$$\beta_0 = \text{artg} \frac{h}{Mg} \quad (15)$$

$$f_0 = \frac{S}{8T_0} (Mg \cos \beta_0 + h \sin \beta_0) \quad (16)$$

$$\dot{\beta}_0 = 0 \quad (17)$$

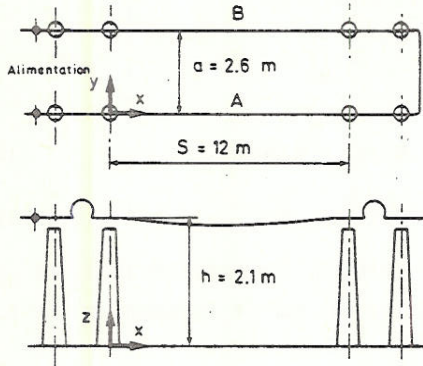
$$\dot{f}_0 = 0 \quad (18)$$

### 5.3. APPLICATIONS

#### 5.3.1. Comparaisons SAMCEF-pendule [177,178]

Nous avons traité numériquement par SAMCEF [177] et par le modèle proposé deux cas, suivant une disposition pratique utilisée par des chercheurs polonais (fig. 4) [182].

Le premier cas est défini par les données suivantes :



$S = 12 \text{ m}$   
 $T_0 = 2000 \text{ N}$  ( $f_0 = 17,5 \text{ cm}$ )  
 $A = 587 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$   
 $m = 1,97 \text{ Kg/m}$  ( $M = 23,6 \text{ Kg}$ )  
 $E = 7,14 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$   
 $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$   
 $\rho = 3360 \text{ Kg/m}^3$   
 $K = 2 \cdot 10^5 \text{ N/m}$   
 pente d'échauffement :  $3,2 \text{ } ^\circ\text{C/S}$

$I_{\text{eff}} = 10000 \text{ A}$   
 Pas d'asymétrie  
 Durée  $0,4 \text{ s}$

Figure 4  
La configuration polonaise. Les supports sont des isolateurs.

Le deuxième cas est quasi identique. Seule la section des câbles est doublée  $A = 1174 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$   
 d'où :  $M = 47,3 \text{ Kg}$  ( $f_0 = 34,7 \text{ cm}$ )  
 et la pente d'échauffement :  $0,8 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

Le temps de calcul SAMCEF pour un cas complet était d'environ trente minutes pour une étude qui portait sur  $1,8 \text{ s}$  (schéma du trapèze). Le pendule à deux degrés de liberté fait l'étude sur la même période en 10 secondes (DECSYSTEM 2050).

Les figures 5 et 6 sont relatives au premier cas ( $A = 587 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ ). Les figures 7 et 8 sont relatives au deuxième cas ( $A = 1154 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ ). Elles représentent le déplacement à mi-portée (avec anamorphose) et la tension mécanique dans le câble.

Les différences avec SAMCEF sont au maximum de 5% sur la valeur maximale de la tension (fig. 8). Les débattements des câbles sont remarquablement suivis par le pendule même après le premier coup de fouet.

On remarquera toutefois un écart en fréquence conduisant à une valeur plus élevée de cette dernière dans le cas du pendule. Ce problème est lié à la constitution élémentaire du modèle, notamment à la "concentration" de la masse. Cet effet n'a pas d'influence directe sur les valeurs qui nous préoccupent à savoir le rapprochement entre phases et les tensions maximales.

Ces deux premiers cas sont évidemment bien adaptés au modèle vu la géométrie simple et l'absence de dérivations. Néanmoins, ce type de structure se rencontre fréquemment dans les postes lors des liaisons entre appareillages au sol, d'où son intérêt, et celui de la méthode.

COMPARAISON SAMCEF (pointillé) - Pendule (trait plein)

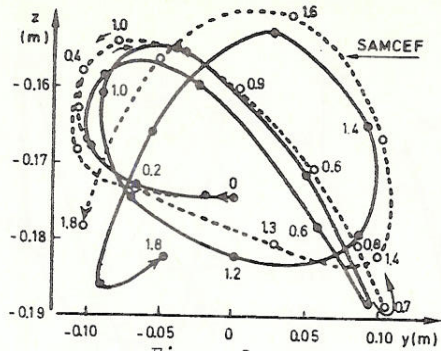


Figure 5

Premier cas. Mouvements d'une phase à mi-portée dans le plan YZ parallèle à celui défini à la fig. 4.  
 N.B. Le calcul SAMCEF conduit à une trajectoire identique à l'aller et au retour du premier coup de fouet.

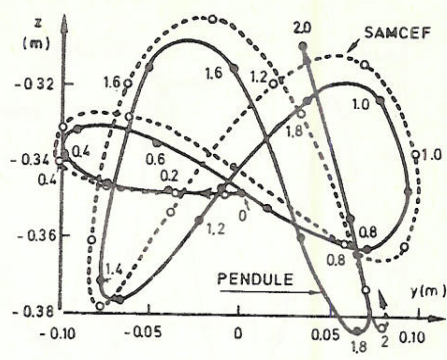


Figure 7

Deuxième cas. Mouvements d'une phase à mi-portée dans un plan YZ parallèle à celui défini à la fig. 4.

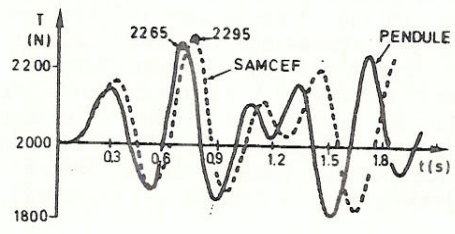


Figure 6

Premier cas. Evolution de la tension mécanique dans une phase à un ancrage, en fonction du temps.

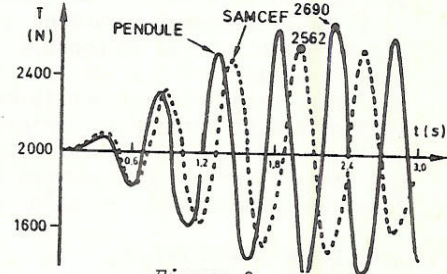


Figure 8

Deuxième cas. Evolution de la tension mécanique dans une phase à un ancrage, en fonction du temps.

5.3.2. Comparaisons de résultats expérimentaux avec le pendule.

Ce troisième cas sera volontairement choisi complexe. La structure a été essayée à Laborelec, les détails sont repris au chapitre 4 (paragraphe 4.2).

Le schéma de l'installation est décrit également dans ce chapitre. La modélisation par le pendule nécessite une première étape pour déterminer les caractéristiques du modèle et notamment sa masse. En effet, nous devons y faire intervenir la masse du câble et une partie de la masse des armements. En pratique, on tentera de respecter la flèche et la tension qui peuvent être déterminées par une position de référence SAMCEF dans les cas difficiles. On en déduira :

$$M = \frac{8f_0 T_0}{9S} \quad (19)$$

Dans le cas présent, on trouve  $M = 152 \text{ kg}$  ( $f_0 = 0,95 \text{ m}$  et  $T_0 = 7850 \text{ N}$  pour une portée de 40 m) ce qui reprend une participation d'environ 20% de la masse des armements.

Les figures 9 et 10 représentent la comparaison attendue. La concordance est remarquable compte tenu de la complexité du cas envisagé La figure 10 s'écarte de la courbe expérimentale à partir du point de chute mais la tension au coup de fouet est bien respectée comme on devait s'y attendre. On remarquera qu'il n'y a plus de distorsion en fréquence comme dans les deux cas précédents mais le contenu fréquentiel du modèle pendule est évidemment beaucoup plus pauvre.

COMPARAISON : Essai (LABORELEC) - Pendule

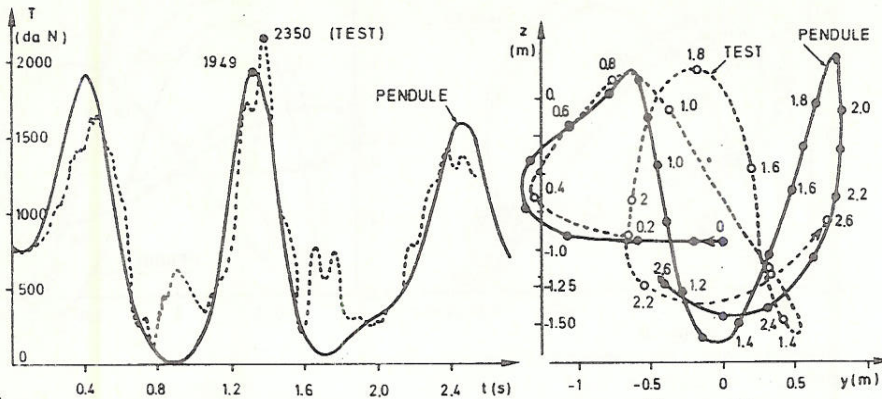


Figure 9

Figure 10

Evolution de la tension mécanique dans une Mouvements d'une phase à mi-phase à un ancrage, en fonction du temps. portée.

L'écart entre les déplacements (fig. 10) est lié à l'hypothèse de conservation d'une géométrie parabolique. Le premier écart est accentué vu l'absence des dériviatives dans le modèle pendule.

Il faut cependant remarquer que les fig. 9 et 10 sont relatives à la phase "ouest" et que le pendule ne peut donner que les mêmes courbes pour la phase "est". Or on a vu au chapitre 4 que les comportements des deux phases étaient sensiblement différents par suite de l'effet des dériviatives et notamment l'orientation (toutes sont situées côté ouest) de leurs ancrages au sol par rapport au mouvement initial de répulsion des câbles. Enfin, nous pouvons rappeler les temps de calcul SAMCEF (environ 3 heures CPU) et celui demandé par le pendule (10 secondes).

5.4. ETUDE PARAMETRIQUE

Après avoir vérifié la validité du modèle simplifié, nous pouvons aborder une analyse de la sensibilité de différents paramètres sur la valeur des débattements et des tensions mécaniques.

Nous avons choisi d'étudier le comportement des cinq variables suivantes, sans dimensions, repérées à la figure 11.

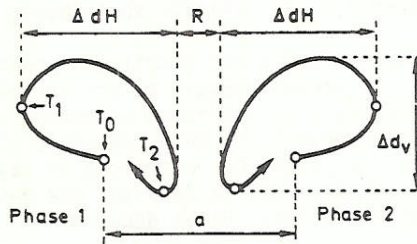


Figure 11

Allure générale du mouvement des câbles à mi-portée. Définitions de quelques grandeurs.

$\frac{T_1}{T_0}$  : tension du premier écart rapportée à la tension initiale



$\frac{T_2}{T_0}$  : tension du coup de fouet rapportée à la tension initiale

$\frac{a-R}{f_0}$  : où R est la distance d'isolement et "a" la distance initiale entre phases

$\frac{\Delta dH}{f_0}$  : débattement horizontal rapporté à la flèche initiale

$\frac{\Delta dv}{f_0}$  : débattement vertical rapporté à la flèche initiale.

Les différents paramètres que nous pouvons envisager sont les suivants :

	Symboles	Unités
- intensité de court-circuit	$I_{eff}$	A
- constante de temps du réseau	$\tau$	s
- durée du court-circuit	$t_{c-c}$	s
- tension de pose	$T_0$	N
ou la flèche	$f_0$	m
- portée	S	m
- distance entre phases	a	m
- section du câble	A	m <sup>2</sup>
- raideur des structures d'ancrages	K	N/m

Nous avons introduit dans un but de généralisation, les huit paramètres suivants, sans dimension, à l'exception de deux d'entre eux :

TABLEAU : voir page suivante.

Nous donnerons quelques détails relatifs à l'emploi de ces paramètres dans le texte.

N° repère	Param.	Valeurs	Remarques
1	$\frac{F_{elm}}{Mg}$	$0,2 \frac{I_{eff}^2 \cdot 10^{-6}}{Mg \cdot a} \cdot S_F$	où $F_{elm}$ est la force électromagnétique totale. Ce paramètre fait ressortir l'influence de l'intensité du court-circuit ( $I_{eff}$ ) et de la distance entre phase (a)
2	n	$\frac{t_{c-c}}{\sqrt{f_0}}$	ce paramètre est lié à la définition de la période d'oscillation d'un pendule à un degré de liberté. Il rappelle le nombre Frøde que nous verrons au chapitre 6. Ce paramètre fait ressortir l'influence de la durée du court-circuit ( $t_{c-c}$ )
3	m	$\frac{100f_0}{S}$	ce paramètre donne le pourcentage de la portée que représente la flèche. Ce paramètre fait ressortir notamment l'influence de la tension initiale ( $T_0$ )
4	t	$\frac{f_0 T_0}{KA} = \frac{\rho g S^2}{K}$	ce paramètre fait ressortir notamment l'influence de la portée (s) quand "m" (paramètre 3) reste constant
5	q	$\frac{KS}{T_0}$	Ce paramètre fait ressortir notamment l'influence de la raideur d'ancrage (K) et l'influence de la section des conducteurs (A) quand m (paramètre 3) reste constant.
6	T	T	La constante de temps équivalente du réseau
7	$p = \frac{q \cdot m}{100}$	$\frac{K f_0}{T_0}$	paramètre associé aux paramètres 3 et 5
8	$v = \frac{K \cdot m}{100}$	$\frac{K f_0}{S}$	paramètre associé au paramètre 3 et à la raideur d'ancrage.

Dans les paragraphes qui suivent nous étudions le comportement des cinq variables  $\frac{T_1}{T_0}$ ,  $\frac{T_2}{T_0}$ ,  $\frac{\Delta dH}{f_0}$ ,  $\frac{\Delta dv}{f_0}$  et  $\frac{a-R}{f_0}$  sur une plage de variation du paramètre 1 ( $\frac{Fe1m}{Mg}$ ) comprise entre zéro et six, et pour quelques valeurs particulières de la durée du court-circuit, de la portée, de la tension de pose, de la raideur des ancrages, de la section des conducteurs et de la constante de temps du réseau (soit six quantités). L'influence de la distance entre phases est implicitement prise en compte par le choix de la variable  $\frac{a-R}{f_0}$  et du paramètre  $\frac{Fe1m}{Mg}$ . Nous indiquerons en vue de la discussion générale les valeurs particulières des paramètres 2 à 8.

Afin d'effectuer cette recherche dans les plages habituelles de variation des différents paramètres, nous avons défini un cas de base autour duquel nous ferons varier successivement les six quantités citées ci-dessus. Il s'agit du premier cas LABORELEC détaillé au chapitre 4 (paragraphe 2) mais avec une asymétrie nulle, une flèche initiale arrondie à 1 m, une rigidité d'ancrage arrondie à  $1,5 \cdot 10^5$  N/m et une durée de court-circuit de 0,2 s.

Pour rappel, les autres données étaient :

Grandeurs	Symb.	unités	Valeurs
section	A	m <sup>2</sup>	324 10 <sup>-6</sup>
distance entre phases	a	m	2,5
portée	S	m	40
masse totale* équivalente	M	Kg	152
tension de pose**	T <sub>0</sub>	N	7460

\* Il s'agit de la masse du pendule équivalent définie au paragraphe 5.3.2.

\*\* T<sub>0</sub> est ajustée pour respecter une flèche de 1m

#### 5.4.1. Influence de la durée du court-circuit (fig. 16 à 24)

L'utilisation du paramètre 2 ( $n = \frac{t_{c-c}}{\sqrt{f_0}}$ ) plutôt que la durée elle-même permet, grâce au choix également des ordonnées et des abscisses sans dimension, d'obtenir un faisceau de courbes indépendant du cas choisi et uniquement fixé par les valeurs des paramètres

$$m = 2,5, t = 150, q = 800, p = 20, v = 3750$$

Dans une situation particulière du cas de base (le cas LABORELEC cité plus haut) ces valeurs correspondent par exemple à

$$f_0 = 1m, S = 40m, A = 324 \cdot 10^{-6} m^2, K = 1,5 \cdot 10^5 N/m \text{ et } T_0 = 7460N$$

et le faisceau de courbes est relatif à différentes durées de court-circuit (puisque  $f_0 = 1m$ , les valeurs du paramètre  $n$  représentent les durées de court-circuit pour le cas de base).

Par souci de clarté, nous avons scindé les courbes relatives à  $n \leq 0,4$ , appelées "courtes durées", et celles relatives à  $n > 0,4$ ,

appelées "longues durées". Prière de se référer à la figure 11 pour la définition des ordonnées des courbes.

5.4.1.1. Influence du paramètre  $n$  sur la tension du premier écart.

$\frac{T_1}{T_0}$  (fig. 16, 17, 21) est logiquement croissante avec la force électromagnétique et la durée du court-circuit. Cependant, la valeur du rapport  $\frac{T_1}{T_0}$  tend vers une limite dès que  $n = 0,3$  (voir fig. 21). La durée du court-circuit correspond dans ce cas au temps nécessaire au câble pour atteindre sa position extrême. La quasi simultanéité entre ces deux phénomènes peut expliquer l'allure asymptotique de la fonction. En-deçà de cette durée critique, le câble poursuit son mouvement pendulaire par inertie, il est donc logique d'observer des contraintes plus faibles. Au-delà, l'augmentation de raideur crée une force de rappel suffisante pour contrebalancer la force électromagnétique. Si la durée du court-circuit se prolonge suffisamment, on pourra assister à une nouvelle répulsion dès que les forces élastiques le permettront (fig. 12)



Figure 12

Allure du mouvement d'une phase à mi-portée pour court-circuit de longue durée.

Enfin, la croissance  $\frac{T_1}{T_0}$  devient linéaire au-delà de  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 2$ , avec une pente d'environ  $45^\circ$  pour les valeurs particulières choisies pour les paramètres. Ceci revient à dire que  $T_1$  augmente linéairement avec le carré de l'intensité du courant.

5.4.1.2. Influence du paramètre  $n$  sur la tension à l'instant du premier coup de fouet.- L'évolution de  $\frac{T_2}{T_0}$  (fig. 16, 17, 22) présente trois zones qui correspondent à trois allures différentes du mouvement du câble. La première zone, qui correspond grosso modo à  $\frac{F_{elm}}{Mg} < 2$  entraîne  $T_2 > T_1$  (avec un maximum d'environ  $2,6 T_0$  pour les valeurs particulières des paramètres). Le mouvement est schématisé à la figure 13.

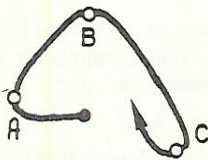


Figure 13

Allure du mouvement d'une phase à mi-portée pour une valeur du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  proche de 2

Il existe un point de chute (B) où l'énergie cinétique est faible. La deuxième zone qui correspond en gros à  $2 < \frac{F_{elm}}{Mg} < 3$  entraîne  $T_2 < T_1$  sauf pour une faible durée du court-circuit auquel cas la zone est reportée plus loin dans les abscisses. Le mouvement est schématisé à la figure 14.



Figure 14

Allure du mouvement d'une phase à mi-portée pour une valeur du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  comprise entre 2 et 3.

Il n'existe plus de point de chute, le mouvement est circulaire et le coup de fouet fortement atténué. La troisième zone qui correspond grosso modo aux valeurs de  $\frac{F_{elm}}{Mg} > 3$  qui entraîne  $T_2 \approx T_1$  si  $n \leq 0,4$  et  $T_2 < T_1$  si  $n > 0,4$ . Le mouvement est esquissé à la figure 15 si  $n \leq 0,4$ , la figure 12 indiquait déjà le cas  $n > 0,4$ .

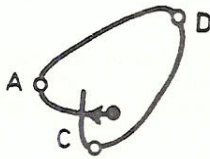


Figure 15

Allure du mouvement d'une phase à mi-portée pour une valeur du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  supérieure à 3, si  $n < 0,4$ .

L'énergie apportée au câble (si  $n \leq 0,4$ ) provoque une succession de coups de fouet horizontaux (D) puis verticaux (C) qui provoquent des tensions du même ordre de grandeur. Si  $n$  est plus grand que 0,4 (fig.12) la modification imposée, à contrario, par la trajectoire annihile les coups de fouet.

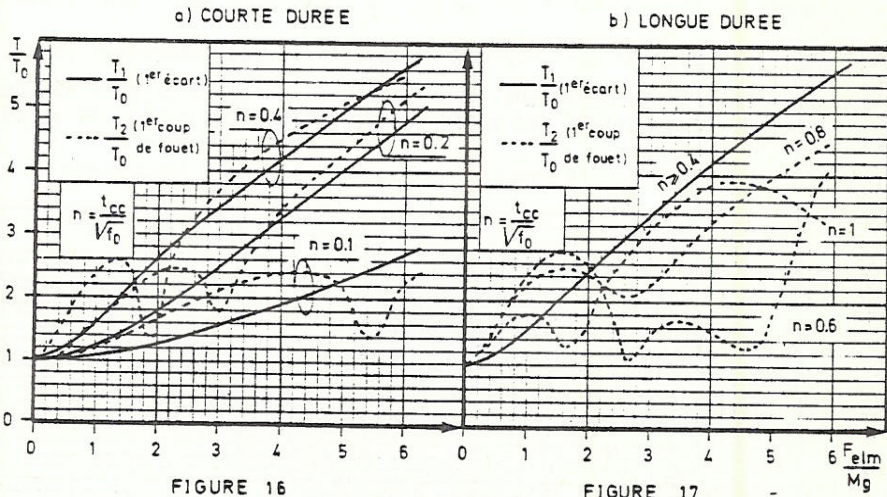


FIGURE 16

FIGURE 17

Figures 16 et 17

Evolution relative à la valeur initiale ( $T_0$ ) de la tension du premier écart ( $T_1$ ) et du premier coup de fouet ( $T_2$ ) en fonction du paramètre  $F_{elm}/Mg$  pour quelques valeurs particulières de  $n = \frac{tc-c}{f_0}$ . On a scindé  $n \leq 4$  (fig. 16) et  $n > 0,4$  (fig. 16) et  $n > 0,4$  (fig. 17).

A titre d'illustration, nous allons exposer le raisonnement à suivre pour le dimensionnement d'un cas précis; celui du cas de base. On sait pour l'avoir déjà étudié, que la masse totale à prendre en compte est d'environ 150 kg ce qui nous permet d'établir les correspondances du tableau 1 (écart entre phases de 2,5 m).

$\frac{F_{elm}}{Mg}$	$I_{eff}$ (kA)	$\frac{T}{T_0}$ val. max.
2	30,5	3
3	37	4
6	53	6

TABLEAU 1. Recherche des contraintes maximales pour le cas de base

Ce qui correspond pour la contrainte maximale (avec une asymétrie nulle) à un maximum de  $3T_0$  soit 22380 N par phase si l'intensité efficace est inférieure à 30000 A, et pour les valeurs supérieures à un maximum donné par la relation

$$T_{MAX} = 3T_0 + (0,0022I^2 - 2) \cdot T_0 \quad (14)$$

(I en kA,  $T_{MAX}$  en Newton par phase)

5.4.1.3. Influence du paramètre n sur les débattements des câbles.- Les figures 18, 19, 23 et 24 indiquent ce comportement. Pour de faibles durées de court-circuit ( $n \leq 0,1$ ), la croissance est linéaire avec  $\frac{F_{elm}}{Mg}$ , au delà on voit rapidement apparaître une saturation liée à la non linéarité du phénomène. Comme pour les tensions on observe une tendance asymptotique des valeurs pour  $n \geq 0,3$  (voir fig. 19 et 23).

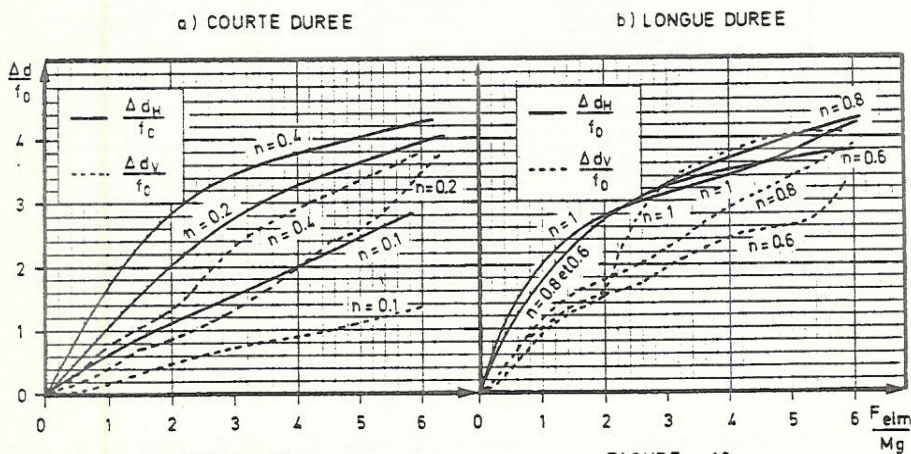


FIGURE 18

FIGURE 19

Figures 18 et 19

Evolution relative à la flèche initiale ( $f_0$ ), du débattement horizontal ( $\Delta dv$ ) en fonction du paramètre  $F_{elm}/Mg$  pour quelques valeurs particulières de  $n = \frac{t_c - e}{f_0}$

Les débattements verticaux, d'abord sensiblement inférieurs aux horizontaux s'en rapprochent fortement pour les valeurs élevées de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$ , il y correspond non pas une allure circulaire mais plutôt celle représentée à la figure 15.

Il est remarquable de constater que ces débattements peuvent atteindre et dépasser quatre fois la flèche initiale. Cette amplification est liée à l'élasticité et l'échauffement du câble d'une part et à la rigidité des ancrages d'autre part.

5.4.1.4. Influence du paramètre  $n$  sur la distance d'isolement entre phases.- La figure 20 donne l'évolution de la somme des mouvements de rapprochements des deux phases en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  pour des valeurs croissantes de  $n$ . Cette figure permet de chiffrer la distance d'isolement  $R$  indépendamment de la distance entre phases grâce au choix approprié des abscisses et ordonnées. La pente sensible de la distance d'isolement est principalement localisée en deçà de  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 2$  où l'on observe une pente maximale d'environ  $60^\circ$  dans le cas étudié. Au-delà la pente est réduite à  $10^\circ$  environ.

En réalité cette variable sera favorablement influencée par la présence de dérivations qui le plus souvent limiteront l'amplitude des débattements.

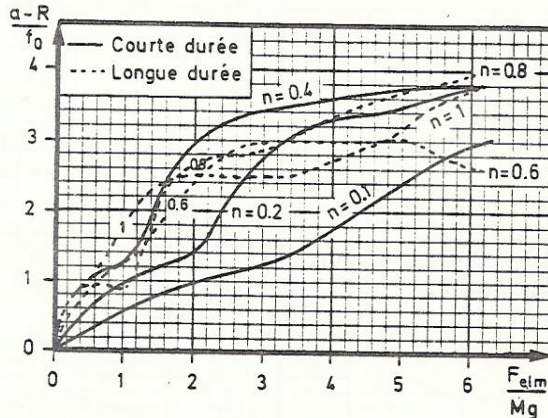


Figure 20

Evolution relative à la flèche initiale ( $f_0$ ) de la somme des mouvements de rapprochements des deux phases ( $a-R$ ) en fonction du paramètre

$F_{elm}/Mg$  pour quelques valeurs particulières de  $n = \frac{t_{e-c}}{f_0}$ . On déduira, de cette figure, la distance d'isolement  $R$ .

A titre d'illustration nous exposerons le raisonnement à suivre dans le cas précis relatif au cas de base (poste 150 kV, 2,5 m entre phases). La distance d'isolement  $R$  entre phases (référée à la fig. 11) est imposée par une tenue diélectrique de l'intervalle d'air.

Cette tenue peut être définie à fréquence industrielle (50 Hz) par la formule (i)

$$U_{50\%} = 1,6 \cdot \frac{3400}{1 + \frac{d}{8}} \quad (20)$$

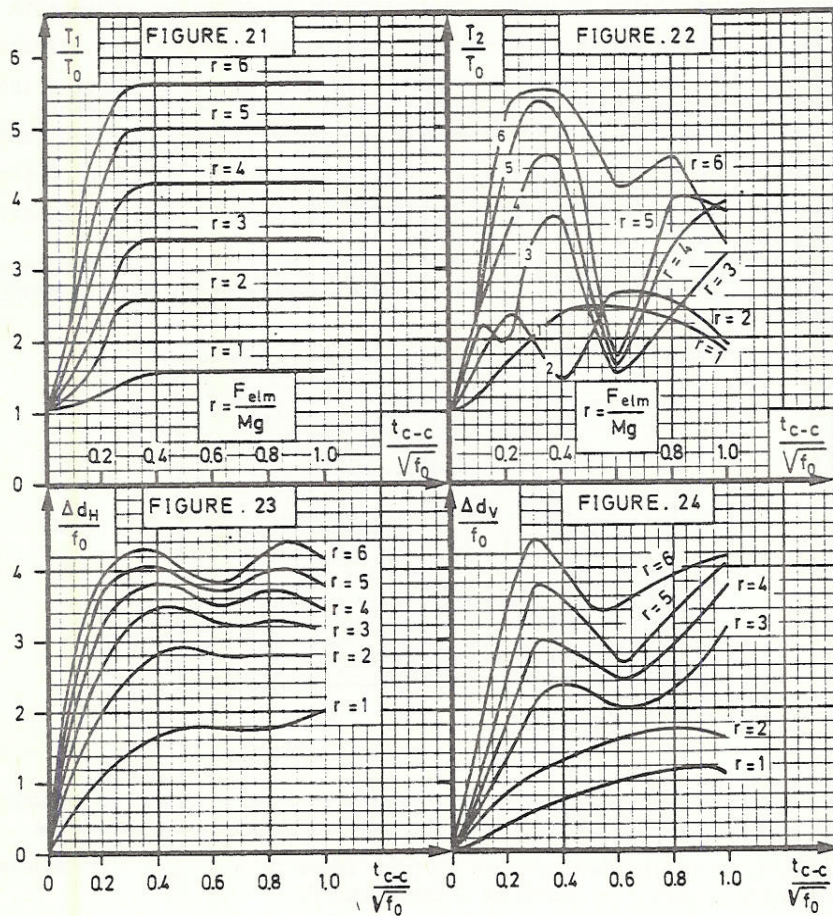
(i) Lignes aériennes à haute et très haute tension. Règles d'isolation. Elect. de France. Direction des études et recherches, juin 76. La formule (20) du texte se trouve p. 24, le facteur de forme 1,6 est tiré du tableau p. 26 de la même référence.

Soit à 150 kV (212 kV crête entre phases) une distance minimale d'environ 35 cm. Ce qui donne pour les ordonnées une valeur limite :

$$\frac{a-R}{f_0} = \frac{2,5 - 0,35}{1} = 2,15$$

On ne peut donc dépasser, dans le cas le plus contraignant, la valeur 1,2 des abscisses qui correspondent au paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$ , c'est-à-dire, dans notre cas particulier, 23 kA d'intensité de court-circuit.

Cette valeur serait encore sensiblement réduite si l'on considérait le cas d'un choc de manoeuvre et à fortiori d'un choc foudre.



Figures 21 à 24

Evolution des grandeurs  $\frac{T_1}{T_0}$ ,  $\frac{T_2}{T_0}$ ,  $\frac{\Delta d_H}{f_0}$  et  $\frac{\Delta d_V}{f_0}$  en fonction du paramètre  $n = \frac{t_{c-c}}{f_0}$ , pour quelques valeurs particulières de  $F_{elm}/Mg$ .

On peut également inverser le raisonnement et rechercher, sur base d'une intensité de court-circuit maximale, la distance entre phases nécessaire pour maintenir une distance d'isolement déterminée.



Par exemple, quelle distance entre phases choisir pour conserver un minimum de 35 cm pour une intensité de 35 kA ? On calculera successivement :

$$\frac{F_{elm}}{Mg} = \frac{0,2 \cdot 35^2 \cdot 40}{a \cdot 150 \cdot 9,81} = \frac{6,6}{a} \quad \text{et} \quad \frac{a-R}{f_0} = \frac{a-0,35}{1}$$

et l'on résoud, dans le cas particulier étudié :

$$(a-0,35) = \text{tg}60^\circ \cdot \frac{6,6}{a} \quad \text{soit} \quad a = 3,6 \text{ m} \quad (\text{première partie de la courbe})$$

Le même câble, pour une intensité de 50 kA conduit à :

$$(a-0,35) = \text{tg}10^\circ \cdot \frac{13,5}{a} + 3,4 \quad \text{soit} \quad a = 4,3 \text{ m} \quad (\text{deuxième partie de la courbe})$$

Ces valeurs minimales entre phases sont nettement plus élevées que celles qui existent au niveau 150 kV (2,5 m en général). Le danger est donc réel mais il faut remarquer que, en pratique, la présence de dérivations non prises en compte par le calcul simplifié limite fortement le rapprochement des phases en défaut.

#### 5.4.2. Influence de la portée (fig. 25)

En pratique dans un poste la flèche est limitée à quelques pour cent de la portée. Ainsi, la modification de la portée entraîne une augmentation de la tension de pose. C'est dans ce cadre que nous avons étudié ce paramètre. Nous avons donc maintenu constants :

$$m = \frac{100f_0}{S} = 2,5, \quad q = \frac{K^3}{T_0} = 800, \quad v = \frac{Kf_0}{S} = 3750 \quad \text{et} \quad p = \frac{Kf_0}{T_0} = 20$$

Nous maintenons également les autres grandeurs constantes, ainsi

$$n = \frac{t_{c-c}}{\sqrt{f_0}} \quad \text{sera conservé à } 0,2$$

Observons dans le cas présent que, comme le paramètre  $m$  reste constant, la flèche varie avec la portée, ce qui, vu la constance de  $n$ , modifie la durée du court-circuit. Nous comprendrons plus loin l'intérêt d'un tel paramètre.

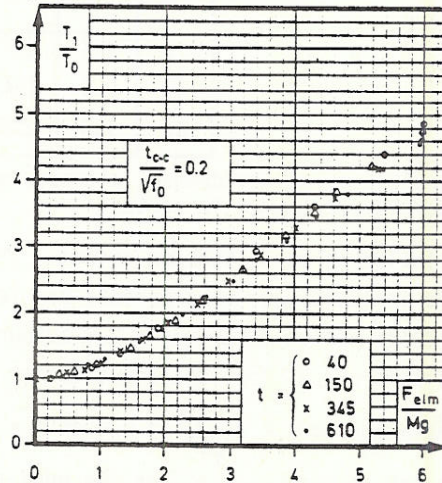


Figure 25

Evolution relative à la valeur initiale ( $T_0$ ), de la tension du premier écart ( $T_1$ ) en fonction du paramètre  $F_{elm}/Mg$  pour quelques valeurs

$$\text{valeurs particulières de } t = \frac{f_0 T_0}{KA} = \frac{pgS^2}{K}$$

Il est remarquable de constater (fig. 25) que, vu le choix des paramètres et des coordonnées, la courbe n'est pas affectée par la longueur de la portée : le paramètre  $t = \frac{f_0 T_0}{KA}$  variant de 40 à 610 n'a donc aucune influence si on maintient m, q, n, p et v constants.

Se référant au cas de base on a la même courbe,  $\frac{T_1}{T_0}$  en fonction de  $\frac{F_{e1m}}{iig}$ , pour une portée de 40 m parcourue pendant 0,2 s par une intensité de court-circuit fixée par la valeur de l'abscisse, que pour une portée de 80 m parcourue pendant 0,28 s ( $= 0,2\sqrt{2}$ ) par la même intensité.

Et inversement, une portée de 80 m parcourue pendant 0,2 s aura un comportement identique à une portée de 40 m parcourue pendant 0,14 s, valeurs que l'on peut déduire des figures 16 à 19 (à condition de maintenir m et q constants, à la valeur indiquée).

Il en est de même pour les autres courbes caractéristiques ( $\frac{T_2}{T_0}$ ,  $\frac{\Delta d}{f_0}$  et  $\frac{a-R}{f_0}$ ).

Partant du cas de base nous pouvons établir le tableau 2 correspondant à une intensité de court-circuit de 30 kA ( $\frac{F_{e1m}}{Mg} \approx 1,92$ )

$S(m)$	$t_{c-c}(s)$	$T_0(N)$	$\frac{T_1}{T_0}$	$T_1(N)$
20	0,14	5970	1,8	10750
40	0,2	7460	1,8	13430
80	0,28	14920	1,8	26860

TABLEAU 2. Contraintes de premier écart, encadrant le cas de base 30 kA, pour différentes portées

Le tableau 3 complète le tableau 2 en donnant les mêmes valeurs mais correspondant à une durée de court-circuit identique, égale à 0,2 s.

$S(m)$	$\frac{T_1}{T_0}$	$T_1(N)$
20	2,1	12540
40	1,8	13430
80	1,4	20890

TABLEAU 3

La contrainte  $T_1$  est évidemment atténuée mais elle correspond encore à un accroissement avec la portée.

#### 5.4.3. Influence de la tension de pose (fig. 26 à 29)

Cette influence est caractérisée par le paramètre  $\frac{100f_0}{S}$  que nous allons faire varier d'environ  $\pm 0,6$  autour de la valeur de référence.

Le paramètre  $q = \frac{KS}{T_0}$  doit également varier ainsi que p et v. Nous maintenons constant  $n = \frac{t_{c-c}}{\sqrt{f_0}} = 0,2$  et  $t = \frac{f_0 T_0}{KA} = 150$ .

Dans le cas de base particulier que nous avons retenu, il y correspond les valeurs

$S = 40$  m,  $A = 324 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>,  $K = 1,5 \cdot 10^5$  N/m, la tension et la

flèche initiales sont variables et vaudront respectivement :

5970 N ( $f_0=1,26m$ ), 7460 N ( $f_0=1m$ ) et 10440 N ( $f_0=0,719m$ )

correspondant à  $m = 3.1$      $m = 2.5$      $m = 1.8$   
 et  $q = 1000$      $q = 800$      $q = 575$

On remarquera que la constance de  $n$  implique une durée de court-circuit variable respectivement, pour ce même cas de base de 0,225 s ( $m=3,1$ ); 0,2 s ( $m=2,5$ ) et 0,17 s ( $m=1,8$ ) ce qui représente une variation limitée et donc de peu d'effet par rapport à une durée constante.

5.4.3.1. Influence sur la tension du premier écart.- Quand  $m$  ou  $q$  augmente la variable  $\frac{T_1}{T_0}$  croît à sollicitation ( $\frac{F_{elm}}{Mg}$ ) identique (fig.26). Mais comme la valeur initiale  $T_0$  est différente, nous avons tracé la figure 27 qui fournit directement une image absolue de la sollicitation (puisque  $Mg$  est constant d'un cas à l'autre).

La figure 27 ne reprend que les deux valeurs extrêmes de  $m$  que nous avons retenues; la valeur intermédiaire se situe entre les deux courbes tracées. L'augmentation de la tension initiale, en partant de  $m=3,1$  à  $m = 1,8$  ne diminue ni n'accroît les contraintes du premier écart sauf pour les faibles valeurs de sollicitation, auquel cas, la différence des tensions initiales est grosso modo maintenue.

Correspondance entre les valeurs  $p$ ,  $v$ ,  $q$  et  $m$  (influence de la tension de pose)

$F$	$v$	$q$	$m$
10,3	2700	575	1,8
22,1	3750	800	2,5
31,6	4660	1000	3,1

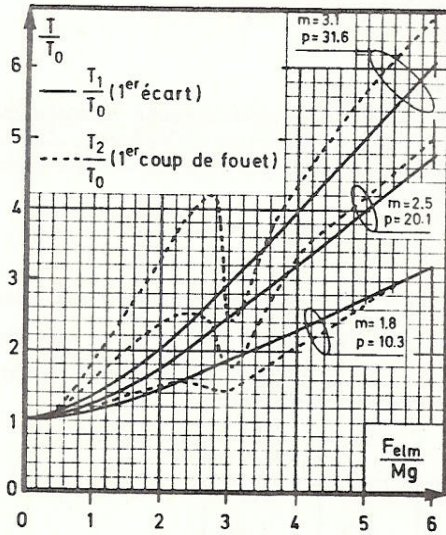


Figure 26

Evolution relative à la valeur initiale ( $T_0$ ), de la tension du premier écart ( $T_1$ ) et du premier coup de fouet ( $T_2$ ) en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  pour quelques valeurs particulières de l'ensemble de paramètres  $m$ ;  $q$ ;  $v$ ;  $p$ .

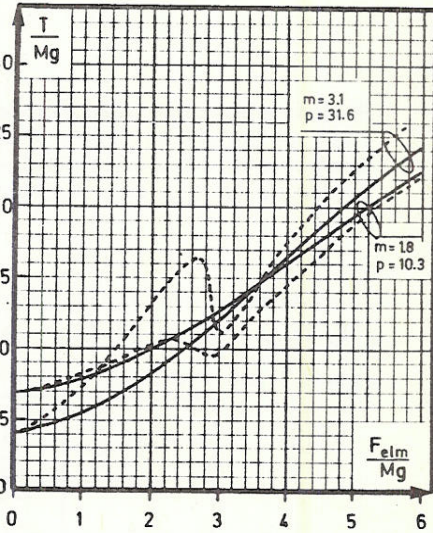


Figure 27

Evolution relative au poids total d'une phase de la tension du premier écart (trait plein) et du premier coup de fouet (trait pointillé) en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  pour quelques valeurs des paramètres  $m$ ,  $q$ ,  $v$  et  $p$ .

5.4.3.2. Influence sur la tension du premier coup de fouet.- Cette tension peut devenir importante dans les zones où existe un point de chute ( $\frac{F_{e1m}}{Mg}$  entre 2 et 3). Il est évident que de faibles valeurs de la tension (donc une grande flèche) conduisent à un coup de fouet plus important en comparaison avec les valeurs de tensions plus élevées. Ce fait est visualisé aux figures 26 et 27.

5.4.3.3. Influence sur les débattements des câbles.- La courbe des valeurs relatives des débattements horizontaux ( $\frac{\Delta d_H}{f_0}$ ) se déplace vers le bas lorsque la tension de pose diminue. Quant aux valeurs absolues de ces débattements horizontaux, elles sont légèrement réduites lorsque la tension croît. C'est l'inverse pour les débattements verticaux (fig. 28)

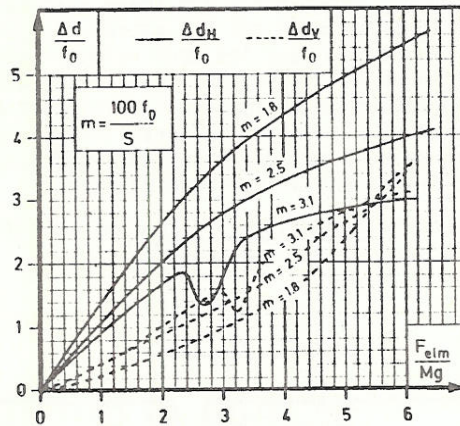


Figure 28

Evolution relative à la flèche initiale des débattements horizontaux ( $\Delta d_H$ ) et verticaux ( $\Delta d_v$ ), d'une phase en fonction de  $F_{e1m}/Mg$ . Les courbes sont établies pour les mêmes valeurs particulières des paramètres  $m$ ;  $q$ ;  $v$ ;  $p$  qu'à la figure 26.

Par exemple, partant du cas de base nous pouvons établir, sur base de la figure 28, le tableau suivant (à l'abscisse  $\frac{F_{e1m}}{Mg} = 4$ , ce qui correspond à une intensité de court-circuit de 37 kA) [Pour rappel  $S=40m$ ]

$m = 100 \frac{f_0}{S}$	$f_0$ (m)	$\frac{\Delta d_H}{f_0}$	$\Delta d_H$ (m)
1.8	0.719	4,34	3,1
2.5	1	3,28	3,28
3.1	1.26	2,64	3,3

TABLEAU 4. Valeurs absolues et relatives des débattements horizontaux encadrant le cas de base pour différentes flèches initiales

On ne conserve pas du tout le gain obtenu sur la flèche initiale. Ce fait est lié à l'élasticité du câble et à la souplesse des ancrages qui donnent plus de "mou" au câble quand la tension augmente.

5.4.3.4. Influence sur la distance d'isolement entre phases (fig. 29).- La discussion se déduit de celle du paragraphe précédent. Supplémentairement aux courbes  $\frac{a-R}{f_0}$ , nous avons tracé en pointillé sur la figure, les valeurs de (a-R) encadrant le cas de base. Il n'y a donc aucun gain dans la distance d'isolement R quand la tension initiale augmente, pour les mêmes raisons que ci-dessus.

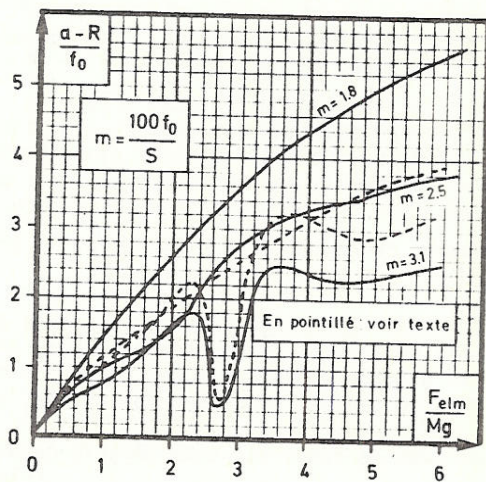


Figure 29

Evolution relative à la flèche initiale de la somme des mouvements de rapprochement des phases (trait plein) en fonction du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  et pour les mêmes valeurs particulières  $m, q, v, p$  que dans les figures 26 à 28. En pointillé, la valeur absolue (a-R) pour un cas particulier détaillé dans le texte.

L'anomalie apparente de la courbe  $m = 3,1$  provient d'un changement brusque d'allure de la trajectoire.

5.4.4. Influence de la raideur des ancrages (fig. 30 à 32)

Cette influence est caractérisée par les paramètres  $q = \frac{KS}{T_0}$ ,  $t = \frac{f_0 T_0}{KA}$  et  $v$ . Nous maintiendrons constants  $n = \frac{t_{c-c}}{\sqrt{f_0}} = 0,2$  et  $m = \frac{100f_0}{S} = 2,5$ . Dans les calculs effectués, on suppose que la flèche initiale est conservée pour une même tension de pose, quelle que soit la raideur des ancrages. En fait, il y correspond une très faible modification de la portée (quelques cm) pour pouvoir conserver les mêmes valeurs initiales.

L'influence de ce paramètre a été étudiée non seulement par la méthode du pendule, comme précédemment, mais également par SAMCEF. L'utilisation du SAMCEF nous a permis de tracer les courbes relatives à une rigidité infinie des ancrages ( $q = \infty$ ). Le pendule présentait en effet des difficultés alors que pour les valeurs inférieures les analyses SAMCEF et pendule conduisaient à des résultats quasi identiques. L'utilisation du SAMCEF nécessite environ quinze minutes de temps de calcul par point calculé. La coïncidence des courbes SAMCEF-pendule permet de valider à posteriori le choix de nos hypothèses, notamment l'adoption de la mesure de JAUMANN. Entre les valeurs des paramètres et celles de la raideur d'ancrage K, on peut établir le parallélisme

du tableau 5, les autres grandeurs (flèche, section ...) restant celles du cas de base.

	q = ∞ p = v = ∞	q = 1600 p = 40,2 v = 7500	q = 800 p = 20,1 v = 3750	q = 400 p = 10,05 v = 1875
K	∞	3.10 <sup>5</sup>	1,5.10 <sup>5</sup>	0,75.10 <sup>5</sup>

TABLEAU 5. Valeurs de la raideur encadrant celles du cas de base, pour différentes valeurs que q, p et v (K en M/m)

5.4.4.1. Influence sur les tensions mécaniques (fig. 30).- Une augmentation de la raideur d'ancrage entraîne une augmentation sensible des tensions mécaniques. La valeur de base que nous avons choisie correspond à un ordre de grandeur habituellement rencontré dans les postes. Une variation d'un facteur 2 de part et d'autre de cette valeur entraîne grosso modo une variation de 25% du rapport  $\frac{T_1}{T_0}$  (dans la zone linéaire, au-delà de  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 2$ ).

Dans un poste la raideur d'ancrage peut devenir très élevée suite à la présence des portées adjacentes qui exercent le même effort mais en sens opposé de part et d'autre d'un portique. Ce seront donc les portées intermédiaires, toutes autres choses égales, qui seront les plus contraintes.

L'amplification du coup de fouet est considérable quand la raideur augmente, dans les zones où existe un point de chute ( $\frac{F_{elm}}{Mg}$  entre 2 et 3) et le passage à la limite (q = ∞), conduit à un pic d'environ 7 fois la valeur initiale (fig. 30), pour des intensités relativement modestes ( $\frac{F_{elm}}{Mg} = 3$ ) et, rappelons-le, une durée de court-circuit relativement brève (n = 0,2). La justification physique de l'augmentation des contraintes avec la raideur provient vraisemblablement de l'influence primordiale des forces élastiques.

Il est enfin remarquable de comparer la figure 30 à la figure 26 relative à l'effet de la tension de pose. La similitude est bien mise en évidence par les paramètres q et p si bien que l'augmentation des raideurs des ancrages à le même effet, toutes autres choses égales, qu'une diminution de la tension de pose. On pourra ainsi compenser les effets de l'augmentation de K par une augmentation correspondante de la tension de pose.

Correspondance entre les valeurs de  $p$ ,  $v$ ,  $t$  et  $q$  (influence de la raideur des ancrages)

$p$	$v$	$t$	$q$
10,05	1875	300	400
20,1	3750	150	800
40,2	7500	75	1600
$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

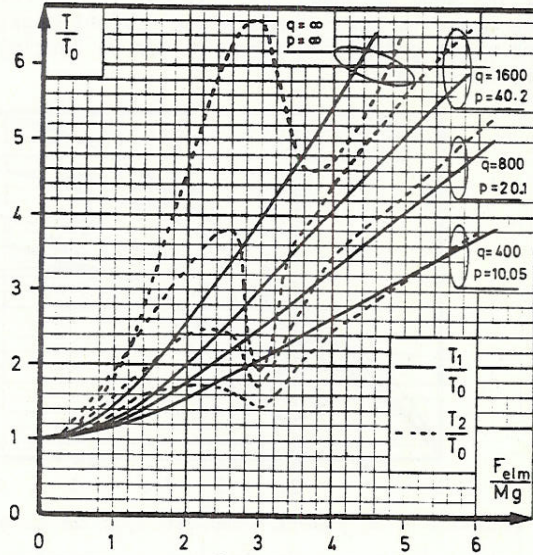


Figure 30

Evolution relative à la valeur initiale ( $T_0$ ) de la tension du premier écart ( $T_1$ ) et du premier coup de fouet ( $T_2$ ) en fonction de  $F_{elm}/Mg$  pour quelques valeurs particulières de l'ensemble des paramètres  $t$ ,  $q$ ,  $p$ ,  $v$ . Seul  $p$  et  $q$  sont repris à la figure,  $t$  et  $v$  s'en déduisent aisément.

5.4.4.2. Influence sur les débattements (fig. 31).- Les débattements sont réduits dans le plan horizontal et amplifiés dans le plan vertical pour une croissance de la raideur. Cependant, une variation d'un facteur 2 de la raideur n'a qu'une influence d'environ 10% sur les débattements.

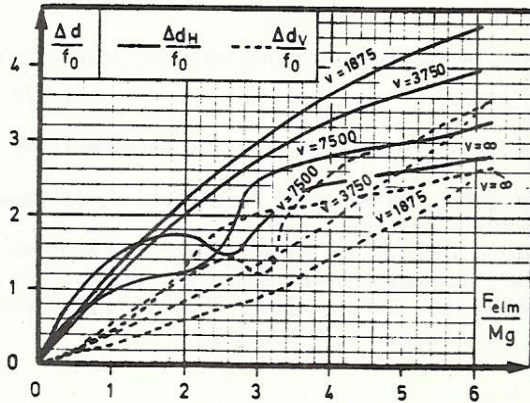


Figure 31

Evolution relative à la flèche initiale des débattements maxima horizontaux ( $\Delta d_H$ ) et verticaux ( $\Delta d_V$ ) en fonction de  $F_{elm}/Mg$ . Les courbes sont établies pour les mêmes valeurs particulières des paramètres  $t$ ,  $q$ ,  $p$ ,  $v$  qu'à la figure 30.

5.4.4.3. Influence sur la distance d'isolement (fig. 32).—Poursuite de la réduction des débattements dans le plan horizontal, on observe une augmentation de la distance d'isolement croissante avec la raideur. L'anomalie apparente de la courbe  $q = \infty$  (calculée par SAMCEF) est liée à une modification subite de l'allure du mouvement.

La courbe en pointillé (indiquée SAMCEF) montre des différences très sensibles par rapport à la même courbe calculée par le pendule alors que les deux autres courbes ( $q = 800$  et  $q = 1600$ ) sont identiques ou presque par les deux méthodes. Ce fait est lié au comportement du modèle pendule quand la tension mécanique devient négative, auquel cas le mouvement reste pendulaire (inscrit sur un cercle) même avec une rotation proche de  $360^\circ$ .

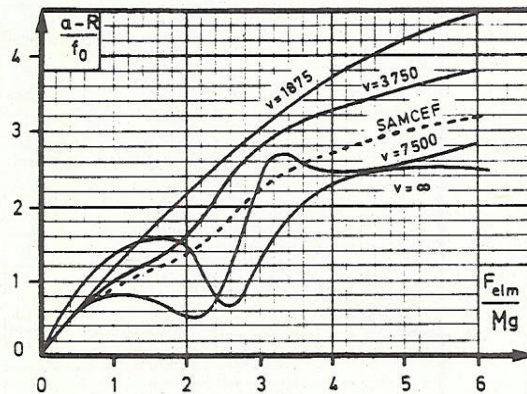


Figure 32

Evolution relative à la flèche initiale ( $f_0$ ) de la somme des mouvements de rapprochement des phases en fonction du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$ , pour les mêmes valeurs particulières de  $t$ ,  $q$ ,  $p$ ,  $v$  que dans les fig. 30 et 31. La courbe en pointillé correspond à  $v=7500$  calculées par SAMCEF. Les courbes  $v=3750$  et  $v=1875$  calculées par SAMCEF sont quasi-identiques aux courbes calculées par le pendule (trait plein).

#### 5.4.5. Influence de la section des conducteurs (fig. 33 à 34)

Cette influence a été étudiée en tenant compte de certains impératifs pratiques. Ainsi, la tension de pose ayant été corrigée proportionnellement à la section, le paramètre  $m = \frac{100f_0}{S}$  a été maintenu constant, de même que le paramètre  $t = \frac{f_0 T_0}{KA}$ .

En résumé, les paramètres constants ont pour valeurs :

$$n = \frac{t_{cc}}{\sqrt{f_0}} = 0,2 \quad m = 2,5 \quad t = 150 \quad v = 3750$$

ce sont donc les paramètres  $q$  et  $p$  qui caractérisent l'influence désirée.

Bien évidemment, la masse et la pente d'échauffement seront corrigées en fonction de la section.

Le tableau 6 indique les valeurs particulières de la section et de la tension des conducteurs qui encadrent les valeurs correspondantes du cas de base, les autres valeurs restent inchangées, notamment :

$$f_0 = 1 \text{ m} \quad S = 40 \text{ m} \quad K = 1,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$



	q = 2500 p = 62,5	q = 800 p = 20,1	q = 430 p = 10,8
A (m <sup>2</sup> )	105 10 <sup>-6</sup>	324 10 <sup>-6</sup>	600 10 <sup>-6</sup>
T <sub>0</sub> (N)	2420.	7460.	13815.

TABLEAU 6. Valeurs particulières de la section des conducteurs encadrant le cas de base, pour différentes valeurs des paramètres q et p

5.4.5.1. Influence sur les tensions mécaniques (fig. 33).- Les valeurs relatives des tensions mécaniques sont très sensiblement influencées mais il faut garder en mémoire l'évolution de T<sub>0</sub> et de la masse avec la section; ainsi nous présentons, pour la bonne compréhension, au tableau 7, les valeurs absolues des tensions mécaniques.

Ces valeurs de  $\frac{T_1}{T_0}$  sont tirées de la figure 33. Si nous fixons une intensité de courant de court-circuit de 30 kA il y correspond (pour rappel a = 2,5 m):

valeur de p	Section des conducteurs (m <sup>2</sup> )	Valeurs de $\frac{F_{elm}}{Mg}$	$\frac{T_1}{T_0}$	Valeurs de T <sub>0</sub> (N)	Valeurs de T <sub>1</sub> (N)
62,5	105 10 <sup>-6</sup>	5,9	6,8	2420	16460
20,1	324 10 <sup>-6</sup>	1,9	1,8	7460	13430
10,8	600 10 <sup>-6</sup>	1,04	1,2	13815	16580

TABLEAU 7. Tensions du premier écart encadrant le cas de base, pour différentes valeurs de p

Correspondance entre les valeurs de p et q (influence de la section des conducteurs)

p	q
10,8	430
20,1	800
62,5	2500

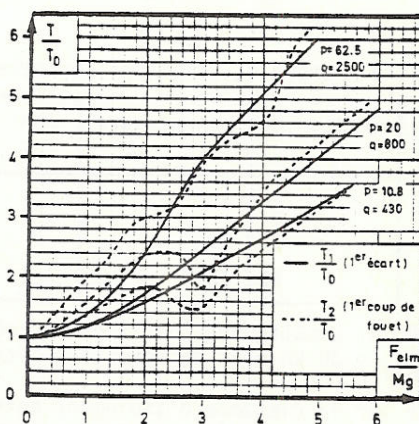


Figure 33

Evolution relative à la valeur initiale (T<sub>0</sub>) de la tension du premier écart (T<sub>1</sub>) et du premier coup de fouet (T<sub>2</sub>) en fonction de F<sub>elm</sub>/Mg pour quelques valeurs particulières du couple de paramètres q, p.

Il apparaît donc une variation de la contrainte absolue présentant un minimum pour les sections moyennes. Le maintien logique du paramètre "m" constant fait donc ressortir l'atténuation de l'effet d'un changement de section sur les valeurs absolues des tensions mécaniques.

5.4.5.2. Influence sur les débattements des câbles (fig. 34).- Cette influence, à m, t, n et v constants, est négligeable sauf pour des intensités conduisant à des abscisses  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  supérieures à cinq unités. La croissance des débattements est quasi linéaire en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  avec une pente de 45 degrés pour les valeurs particulières des paramètres m, n, t, v. La courbe de ces débattements est peu sensible au paramètre p. En valeurs réelles, il est bien certain que pour une intensité donnée les débattements s'accroissent quand la section est plus faible, Mg étant réduit.

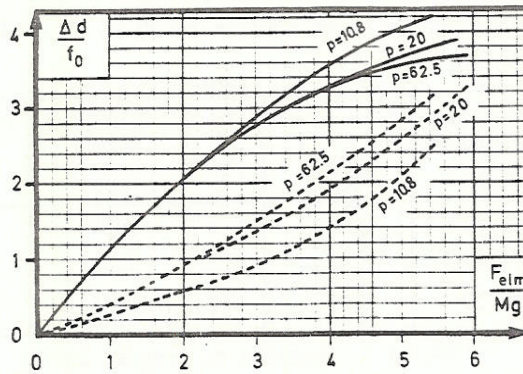


Figure 34

Evolution relative à la flèche initiale ( $f_0$ ) des débattements maximaux horizontaux (traits pleins) et verticaux (traits pointillés) en fonction du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  et pour les mêmes valeurs particulières des couples de paramètres q, p qu'à la figure 33.

Nous pouvons, à titre d'exemple, compléter le tableau 7 par le tableau 8:

Section des conducteurs (m <sup>2</sup> )	ΔdH (m)
105 10 <sup>-6</sup>	3,7
324 10 <sup>-6</sup>	2
600 10 <sup>-6</sup>	1,1

TABLEAU 8. Débattements horizontaux encadrant le cas de base,  $I_{eff} = 30$  kA pour différentes sections de conducteurs

5.4.5.3. Influence sur la distance d'isolement entre phases (fig. 35).- Par similitude évidente avec la figure 34 les courbes représentant la somme des débattements extrêmes sont quasi indépendantes du paramètre p dans la zone observée.

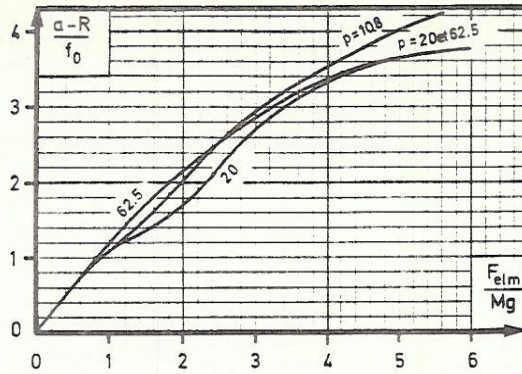


Figure 35

Evolution relative à la flèche initiale de la somme des mouvements de rapprochement des phases en fonction du paramètre  $F_{elm}/Mg$  pour les mêmes valeurs particulières de  $q, p$  que dans les fig. 33 et 34. On en déduira aisément la distance d'isolement  $R$ .

Le tableau 9 donne un exemple d'application à placer à la suite des tableaux 7 et 8..

Section des conducteurs ( $m^2$ )	$R$ ( $m$ )
$105 \cdot 10^{-6}$	-1,2*
$324 \cdot 10^{-6}$	+0,8
$600 \cdot 10^{-6}$	+1,4

\* La valeur négative correspond à un croisement des phases.

TABLEAU 9. Distance d'isolement entre phases encadrant le cas de base,  $I_{eff} = 30$  kA pour différentes sections

#### 5.4.6. Influence de la constante de temps du réseau (fig. 36 à 38)

Pour rappel, l'expression de l'intensité instantanée du courant est :

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

où l'angle  $\phi$  dépend de l'instant d'apparition du défaut dans la sinusoïde de la force électromotrice de l'équivalent de Thévenin à l'endroit du défaut. L'asymétrie est maximale quand  $\phi = -\arctan \omega \tau \approx -\frac{\pi}{2}$  ce qui correspond à l'apparition du défaut au zéro de tension. L'asymétrie est nulle si  $\phi = 0$ , auquel cas, la constante de temps n'a pas d'influence sur l'intensité du courant.

Nous étudierons l'effet de la constante de temps en condition d'asymétrie maximale ( $\phi \approx -\frac{\pi}{2}$ ), la courbe  $\tau = 0$  correspondra quant à elle au cas à asymétrie nulle. Rappelons que toutes les analyses antérieures (paragraphe 5.4.1 à 5.4.5) ont été évaluées avec une asymétrie nulle.

Nous maintenons constants les paramètres :

$$n = 0,2 \quad m = 2,5 \quad t = 150 \quad q = 800 \quad p = 20,1 \quad \text{et } v = 3750$$

5.4.6.1. Influence de la constante de temps sur les tensions mécaniques (fig. 36).- L'accroissement des tensions est significatif même pour une constante de temps de 50 ms par rapport au cas à asymétrie nulle (de l'ordre de 15 à 20% dans le cas étudié).

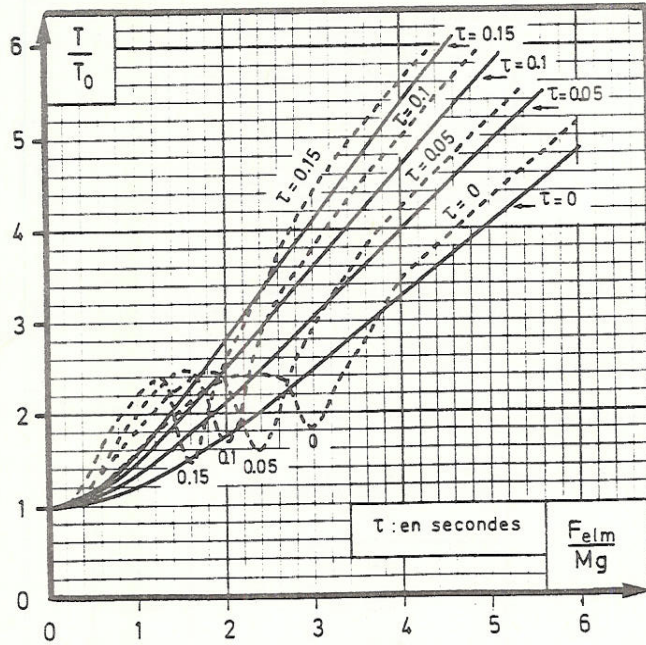


Figure 36

Evolution relative à la valeur initiale ( $T_0$ ); de la tension du premier écart ( $T_1$ ) et du premier coup de fouet ( $T_2$ ) en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  pour quelques valeurs particulières de  $\tau$ .

Cet accroissement peut atteindre 70% pour une constante de temps de 150 ms. Il est évidemment lié à l'apport supplémentaire d'énergie au câble. On remarquera toutefois que l'amplitude maximale du coup de fouet avec point de chute (qui se produit, selon  $\tau$ , pour  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  compris entre 1 et 3) reste constante mais apparaît pour une intensité d'autant plus faible que  $\tau$  augmente.

Par après  $\frac{T_2}{T_0}$  s'accroît comme  $\frac{T_1}{T_0}$ . Cette constatation sur la zone où existe un point de chute est liée physiquement à un débattement vertical en ce point, du même ordre de grandeur quel que soit  $\tau$ . Comme ce point est défini essentiellement par son énergie potentielle (la vitesse est pratiquement nulle, par définition du point de chute), le coup de fouet qui s'ensuit est donc indépendant de  $\tau$  [la figure 37 indique bien cette constance du débattement vertical dans cette zone]

5.4.6.2. Influence de la constante de temps sur les débats (fig. 37).- Ils sont amplifiés dans les deux directions par suite de l'apport d'énergie supplémentaire apportée au câble, avec cependant la remarque que nous venons de faire concernant les débats verticaux à proximité du point de chute.

L'accroissement des débattements horizontaux est limité à 20% maximum tandis que l'on peut atteindre 100% en amplitude verticale dans le cas particulier étudié ( $n = 0,2$ ;  $m = 2,5$ ;  $q = 800$ ;  $t = 150$ ) et entre les deux cas limites ( $\tau = 0$  et  $\tau = 0,15$  s).

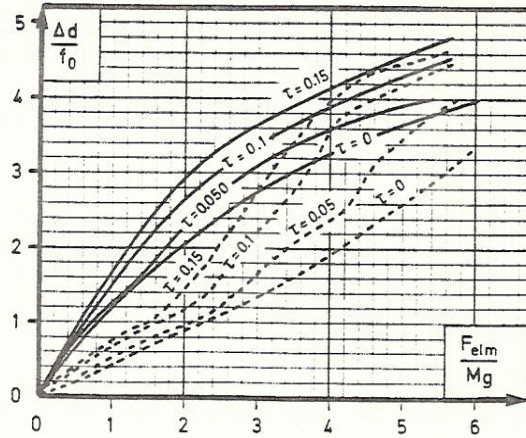


Figure 37

Evolution relative à la flèche initiale ( $f_0$ ), des débattements maximum horizontaux (traits pleins) et verticaux (traits pointillés) d'une phase, en fonction de  $F_{elm}/Mg$ . Les courbes sont établies pour les mêmes valeurs particulières du paramètre  $\tau$  qu'à la fig. 36.

5.4.6.3. Influence de la constante de temps sur la distance d'isolement entre phases (fig. 38).- L'influence est évidemment défavorable mais principalement en deçà de l'abscisse  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 2$ .

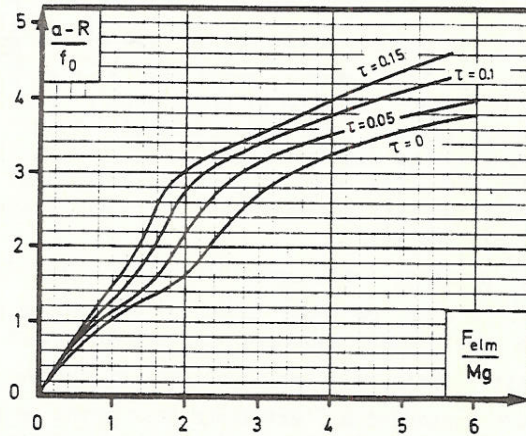


Figure 38

Evolution relative à la flèche initiale ( $f_0$ ) de la somme des mouvements de rapprochements des phases en fonction du paramètre  $F_{elm}/Mg$  pour les mêmes valeurs de  $\tau$  que dans les fig. 36 et 37.

L'exemple particulier, repris au tableau 10, est relatif au cas de base. A l'abscisse  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 2$  y correspond la valeur particulière d'environ 30 kA (pour rappel  $a = 2,5$  m;  $S = 40$  m;  $M = 153$  Kg;  $f_0 = 1$  m).

	$\tau = 0$	$\tau = 0,05$	$\tau = 0,15$ s
$\frac{a-R}{T_0}$	1,6	2,2	3
R(m)	+0,9	+0,3	-0,5*

\* la valeur négative correspond à un croisement des phases

TABLEAU 10. Distance d'isolement dans l'air cas de base, 30 kA, différentes valeurs de  $\tau$

## 5.5. CONCLUSIONS

Ayant analysé l'influence des différentes grandeurs (section des conducteurs, portée, raideur des ancrages, tension de pose, durée de court-circuit et constante de temps) nous pouvons en dégager les conclusions suivantes quant aux contraintes résultantes (notations définies au paragraphe 5.2.2.1).

### 5.5.1. Tensions mécaniques

L'évolution des tensions mécaniques en fonction du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  peut être représentée en général par la variable  $\frac{T}{T_0}$  représentant (en valeurs relatives) la tension lors du premier écart ( $T_1$ ) ou la tension lors du premier coup de fouet ( $T_2$ ) (voir figure 11 au paragraphe 5.4);  $F_{elm}$  représentant la force électromagnétique totale agissant sur une phase (définie à la relation 6) et  $Mg$  le poids total d'une phase que l'on déduit de l'équation 19 (paragraphe 5.3.2).

5.5.1.1. Considérations générales.- La courbe  $\frac{T_1}{T_0}$  en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  est une courbe monotone, croissante qui présente deux parties : en deçà de  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 2$  à 2,5 l'évolution est de type  $\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{F_{elm}}{Mg}\right)^\gamma$  où  $\gamma$  est positif et inférieur à l'unité,  $\gamma$  croît avec  $n$ ,  $p$  et  $\tau$ . Au delà, la croissance devient quasi linéaire et croît avec  $n$ ,  $p$  et  $\tau$ . On peut donc atteindre des valeurs très importantes par rapport à la valeur initiale (entre trois et six fois pour les valeurs habituellement rencontrées dans les postes H.T. et pour les intensités maximales actuelles de court-circuit notamment sur le réseau belge 150 kV et sur le réseau français 400 kV).

La courbe  $\frac{T_2}{T_0}$  présente trois zones distinctes, justifiées au paragraphe 5.4.1.2. Le coup de fouet, quand il existe, ne présente donc une contrainte sensiblement supérieure au premier écart que dans la zone où  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  est inférieure à trois environ, et surtout pour une zone étroite correspondant à l'existence d'un point de chute (défini dans le texte). La zone précitée est fonction des paramètres  $n$ ,  $q$  et  $\tau$  mais l'intensité maximale du coup de fouet est essentiellement liée au paramètre  $q$ . Exceptionnellement,  $T_2$  peut atteindre des valeurs jusqu'à six fois la valeur initiale ( $q = \infty$ ,  $n = 0,2$ ).

5.5.1.2. La durée du court-circuit (fig. 16, 17, 21, 22).- Il existe une durée de court-circuit au delà de laquelle les contraintes plafonnent, voire décroissent. Cette durée semble être bien définie indépendamment de toutes autres caractéristiques par la valeur particulière

du paramètre  $n$  (fig. 17).

$$n = \frac{t_{cc}}{\sqrt{f_0}} \approx 0,3$$

où  $f_0$  est la flèche initiale à mi-portée.

5.5.1.3. Autres grandeurs : portée, raideur, tension et section (fig. 25, 26, 30, 33).- Elles semblent toutes régies uniquement par le paramètre  $p$ , si le paramètre  $n$  est maintenu constant, pour rappel :

$$p = \frac{Kf_0}{T_0}$$

vul'analogie évidente des figure 25, 26, 30 et 33.

Pour une abscisse ( $\frac{F_{elm}}{Mg}$ ) constante, les contraintes croissent avec  $p$  vers une valeur limite ( $p=\infty$ ). Les figures précitées quantifient cette influence si  $n = 0,2$ . On peut donc par exemple compenser une grande raideur d'ancrage en augmentant la tension de pose. On a également intérêt à utiliser, en général des tensions de pose élevées, surtout pour de faibles sections de conducteurs ou de grandes portées. Ce fait est lié à la dépendance réduite des tensions extrêmes  $T_1$  et  $T_2$  par rapport à  $T_0$  (fig. 27).

5.5.1.4. La constante de temps du réseau (fig. 36).- Son effet peut être considérable : même pour de "faibles" intensités de courant de court-circuit, l'asymétrie liée à une grande constante de temps introduit jusqu'à 70% d'accroissement des contraintes entre deux cas extrêmes (asymétrie nulle et asymétrie maximale avec une constante de temps de 150 millisecondes). La figure 36 quantifie cet effet.

5.5.2. Débattements des câbles et distances d'isolement entre phases.

L'évolution de ces grandeurs en fonction du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  peut être représentée en général par les variables  $\frac{\Delta d}{f_0}$  et  $\frac{a-r}{f_0}$  où  $a$  est la distance entre phases,  $R$  la distance d'isolement entre phases et  $f_0$  la flèche initiale.

5.5.2.1. Considérations générales.- Les courbes  $\frac{\Delta d}{f_0}$  et  $\frac{a-R}{f_0}$  en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  sont monotones et croissantes. On y distingue une zone d'accroissement rapide quasi linéaire ( $\frac{F_{elm}}{Mg}$  inférieure à plus ou moins deux unités) suivie d'un coude de saturation et d'une nouvelle zone d'accroissement linéaire mais avec une pente modérée. Tous ces effets sont croissants avec  $n$  (jusqu'à la valeur limite 0,3)  $p$  et  $\tau$ .

L'accroissement des débattements avec l'abscisse  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  est lié à l'élasticité des conducteurs, à la souplesse des ancrages et à l'échauffement du câble. Ces effets combinés peuvent conduire à des débattements supérieurs à quatre fois la flèche initiale (au delà de  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 4$  si  $n = 0,4$ ;  $m = 2,5$  et  $p = 20$  par exemple) ce qui correspond à un doublement de la valeur instantanée de la flèche par rapport à sa valeur initiale. Ce n'est évidemment pas favorable au maintien d'une distance d'isolement correcte entre phases. En pratique, cependant, ces débattements peuvent être limités par la présence de dérivations.

5.5.2.2. La durée du court-circuit (fig. 18 à 20 et 23, 24).- On observe le même phénomène de saturation que pour les tensions pour la valeur  $n = 0,3$  (fig. 23 et 24). Pour les faibles valeurs de  $n$  (inférieures à 0,1) les courbes  $\frac{\Delta d}{f_0}$  et  $\frac{a-R}{f_0}$  en fonction de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  sont quasi linéaires sur

toute la zone d'observation, c'est seulement au delà que l'on observe le coude de saturation cité plus haut.

5.5.2.3. Autres grandeurs : portée, raideur, tension et section (fig. (fig. 28, 29, 31, 32, 34, 35, 37 et 38).- Au vu des figures 31, 32, 34, 35 d'une part et 37, 38 d'autre part, il est certain que le paramètre

$p = \frac{Kf_0}{T_0}$  n'a plus du tout le même effet que pour les tensions. Il semble même ne plus influencer les courbes étudiées (fig. 34 et 35). Les courbes de débattements semblent donc être principalement influencées par le paramètre

$$v = \frac{Kf_0}{S}$$

C'est seulement pour les valeurs élevées de  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  que la dépendance vis-à-vis de  $p$  devient effective également (fig. 35). A abscisse constante, les débattements relatifs diminuent et la distance d'isolement relative augmente (ou  $\frac{a-R}{f_0}$  diminue) quand le paramètre  $v$  augmente,

mais les valeurs absolues de ces grandeurs sont en définitive peu affectées (courbes en pointillé à la figure 29) à abscisse  $\left(\frac{F_{elm}}{Mg}\right)$

constante. Ceci revient à dire, par exemple, que l'augmentation de la tension de pose, toutes autres choses égales, ne permet pas de conserver lors des débattements le gain initial sur la flèche. Ce fait est lié physiquement à l'élasticité des composants (câbles et ancrages) qui provoque un effet accru avec la tension mécanique dans le câble.

5.5.2.4. La constante de temps du réseau (fig. 37 et 38).- Elle conduit à un accroissement des débattements et une réduction sur la distance d'isolement. L'effet est principalement marqué en deçà de  $\frac{F_{elm}}{Mg} = 2$ , auquel cas il peut atteindre 50%. Au delà de cette abscisse l'effet est environ diminué de moitié. Cette influence est quantifiée aux figures 37 et 38.

5.5.3. Configuration des débattements des câbles à mi-portée.

Quelles que soient la portée, la section, la tension initiale, la raideur, la constante de temps ou la durée du court-circuit, on observera le plus souvent (sauf pour les très faibles valeurs du paramètre  $v$ ) l'évolution schématisée à la figure 39.

5.5.4. Paramètres fondamentaux.

La contrainte des conducteurs souples parcourus par des intensités de courant de court-circuit semble être principalement liée à cinq paramètres :

$$n = \frac{t_{c-c}}{\sqrt{f_0}} \quad p = \frac{Kf_0}{T_0} \quad v = \frac{Kf_0}{S} \quad \tau \quad \frac{F_{elm}}{Mg}$$

(notations définies au paragraphe 5.2.2.1).

Le premier ( $n = \frac{t_{c-c}}{\sqrt{f_0}}$ ) permet de définir une durée de court-circuit critique conduisant aux contraintes maximales dans la structure. Cette valeur est comprise entre 0,3 et 0,4.

Le deuxième ( $p = \frac{Kf_0}{T_0}$ ) est lié aux contraintes de tensions mécaniques qui augmentent avec sa valeur.



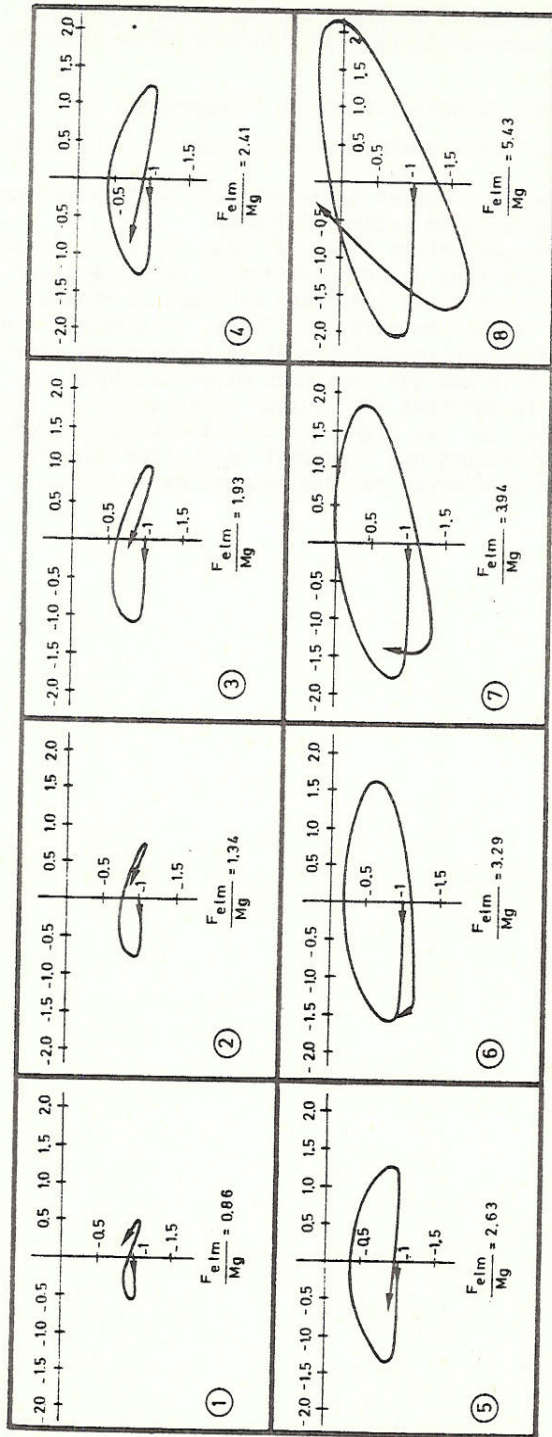


Figure 38

Allure des mouvements d'une phase dans un plan parallèle aux ancrages. L'axe des abscisses est au niveau du point d'ancrage. Les huit dessins correspondent à une valeur particulière du paramètre  $\frac{F_{elm}}{Mg}$  indiqué en cartouche inférieur. La lecture de la figure de haut en bas et de gauche à droite (dans l'ordre de la numérotation de 1 à 8) correspond à une croissance progressive de la charge "électromagnétique". La figure correspond aux valeurs particulières :  $n = \frac{tc-c}{S}$  ;  $\tau = 0$  ;  $v = \frac{Kf_0}{S}$ . Le temps d'observation du phénomène est identique pour toutes les figures ( $4.7 \cdot 10^{-6}$  s).

Le troisième ( $v = \frac{Kf_0}{S}$ ) est lié aux débattements qui diminuent quand

$v$  augmente ce qui favorise un meilleur isolement entre phases.

Le quatrième ( $\tau$ ) est caractéristique de l'endroit où se situe le défaut dans le réseau.

Le cinquième ( $\frac{F_{elm}}{Mg}$ ) est caractéristique de l'importance de la "charge électromagnétique" appliquée à une phase par rapport au poids de cette même phase.

Il est possible de faire varier le paramètre  $p$  tout en maintenant  $v$  constant, ce qui présente un intérêt évident.

L'ensemble des cinq paramètres cités, et ceux-là seuls, permet de juger des influences que nous désirions mettre en évidence; pour rappel: l'intensité du court-circuit, la constante de temps du réseau, la durée du court-circuit, la tension de pose, la flèche, la portée, la distance entre phases, la section des conducteurs et la raideur des structures d'ancrages. C'était là le but que nous nous étions assigné.

Les figures du texte montrent l'influence quantitative de cinq paramètres fondamentaux sur les grandeurs caractéristiques, conséquences des efforts électrodynamiques que l'on peut rencontrer dans les structures à haute tension parcourues par des intensités de courants de court-circuit.

## Chapitre 6

### MODELE REDUIT - PERSPECTIVES

#### 6.1. POSITION DU PROBLEME

Une approche expérimentale en vraies grandeurs des phénomènes qui nous préoccupent s'avère très souvent prohibitive sur le plan financier compte tenu des portées envisagées, des intensités de courant mises en jeu, de la quasi impossibilité de réaliser des essais sur la structure réelle, de la difficulté de reproduire les conditions réelles, etc...

L'étude numérique par contre évite ces écueils grâce à une simulation mathématique, laquelle comporte fatalement des hypothèses dont nous avons déjà discuté. Ces modèles conduisent régulièrement à des temps de calcul de plusieurs heures C.P.U. qui ajoutées au temps de préparation des données et à celui du dépouillement des résultats, conduit à recourir à l'immobilisation d'une personne pour une période de deux à quatre semaines au moins.

Un modèle réduit, une fois les éléments mis en place, ne nécessiterait que peu d'immobilisation tant pour la préparation des données que pour l'exécution d'essais multiples.

La bibliographie est très riche en la matière mais les applications aux problèmes électrodynamiques sont très rarement effleurés [183, 185 à 187, 189 et 190]. La première étape consiste à établir les facteurs d'échelle par une méthode appropriée; nous avons opté pour la méthode d'approche directe par les lois physiques qui guident le phénomène, comme le suggère SCHURING [188]. Cette méthode évite la résolution des équations aux dimensions et permet la détermination rapide des grandeurs sans dimensions ou "nombres  $\pi$ ". La deuxième étape étudie les relations de compatibilité que doivent respecter ces différents " $\pi$ ". On utilisera, le cas échéant, les procédés de segmentation, de relaxation ou le choix d'autres matériaux [184, 188].

Cette étude sera facilitée par l'outil numérique dont nous disposons qui nous permet notamment de scinder les contributions des différentes forces en jeu.

La troisième étape prouvera la validité des facteurs d'échelle obtenus et leur limitations.

#### 6.2. LOIS DE SIMILITUDE ET FACTEURS D'ECHELLE

##### 6.2.1. Hypothèses

On conserve les hypothèses du chapitre 2 et, compte tenu du mouvement des câbles à une vitesse de quelques mètres par seconde, le nombre de Reynold (dans l'air) indique un écoulement turbulent ce qui permet de négliger les forces de viscosité.

##### 6.2.2. Notations

Nous utiliserons les notations générales suivantes :

Symboles	Représentatifs de	unités
F	force (tension mécanique, poids, ...)	N
i	intensité de courant	A
m	masse	Kg
$l$	longueur (portée, distance entre phase, flèche, ...)	m
t	temps (durée du court-circuit, constante de temps, période du courant, évolution temporelle, etc ...)	s

A	section droite des conducteurs	$m^2$
E	module d'élasticité	$N/m^2$
$\rho$	masse volumique	$Kg/m^3$
$\theta$	température	$^{\circ}C$
$\alpha$	coefficient de dilatation thermique linéaire	$^{\circ}C^{-1}$
$\Omega$	résistivité	$\Omega \times m$
C	chaleur spécifique massique	$J/Kg^{\circ}C$
V	différence de potentiel	V
$\pi$	nombre sans dimension	..
$\wedge$	"varie comme"	-

Nous distinguerons un facteur d'échelle sur les longueurs et un sur la section (différent du carré des longueurs) compte tenu de l'indépendance de ces deux variables dans le problème traité.

### 6.2.3. Différents types de forces et nombres $\pi$ correspondants

6.2.3.1. Les forces électromagnétiques.- Elles sont quantifiées par la loi de Biot-Savart :

$$d^2F = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{ds_1 \wedge (ds_2 \wedge r)}{r^3} \quad (\text{formules 76 et 77 du chap. 2})$$

Vu que nous considérons la force totale et que  $\mu_0$  est une constante, le premier nombre  $\pi$  s'écrira

$$\pi_m = \frac{F}{i^2} \quad (1)$$

6.2.3.2. Les forces électrostatiques.- Elles résultent de la loi de Coulomb. Le deuxième nombre  $\pi$  s'écrira, par analogie :

$$\pi_{elst} = \frac{F}{V^2} \quad (2)$$

6.2.3.3. Les forces d'inertie.- Elles sont gérées par la loi de Newton :

$$F \wedge m \cdot \frac{l}{t^2} = \rho A l \cdot \frac{l}{t^2}$$

Le troisième nombre  $\pi$  appelé nombre de Newton s'écrira :

$$Ne = \frac{F t^2}{\rho A l^2} \quad (3)$$

6.2.3.4. Les forces de gravité.-

$$F \wedge mg = \rho A l g$$

Vu la constante g, le quatrième nombre  $\pi$  s'écrira

$$\pi_g = \frac{F}{\rho A l} \quad (4)$$

6.2.3.5. Les forces élastiques.- Au vu des hypothèses préalables, elles peuvent se mettre sous la forme :

$$F \wedge \epsilon EA$$

et vu que  $\epsilon = \frac{F}{t}$  reste constant si on conserve une similitude géométrique, on obtient le cinquième nombre  $\pi$  :

$$\pi_e = \frac{F}{EA} \quad (5)$$

6.2.3.6. Les forces liées à l'allongement élastique du câble sous l'effet de la température.- L'introduction de cette loi dans la recherche des facteurs d'échelle vient de la distinction volontairement maintenue entre le facteur sur  $\lambda$  et le facteur sur A.

$$F \propto \alpha EA \theta$$

Cette loi conduit au sixième nombre  $\pi$

$$\pi_{\alpha} = \frac{F}{EA \alpha \theta} \quad (6)$$

6.2.3.7. La loi d'échauffement du câble.- Décrite en annexe 1, l'échauffement adiabatique est caractérisé par la loi

$$\frac{d\theta}{dt} \propto \frac{\Omega}{\rho C} \cdot \frac{i^2}{A^2}$$

Soit un septième et dernier nombre  $\pi$

$$\pi_{\Omega} = \frac{\rho CA^2 \theta}{\Omega i^2 t} \quad (7)$$

#### 6.2.4. Recherche des facteurs d'échelle

Il est habituel de manipuler les nombres " $\pi$ " et de définir

Le nombre de Cauchy  $Ca = \frac{\pi_e}{Ne} = \frac{\rho \lambda^2}{Et^2} \quad (8)$

Le nombre de Froude  $Fr = \sqrt{\frac{\pi_g}{Ne}} = \frac{\lambda^{1/2}}{t} \quad (9)$

Le nombre  $\pi_A = \frac{\pi_m}{Ne} = \frac{\rho A \lambda^2}{i^2 t^2} \quad (10)$

A matériau identique pour le prototype et le modèle, Ca (8) et Fr (9) font apparaître l'incompatibilité classique [ $\lambda \lambda t$  (8) et  $\lambda \lambda t^2$  (9)] liée au respect simultané des forces élastiques et de gravité (l'utilisation d'un autre milieu que l'air ne résoudrait donc en rien le problème).

L'ensemble des sept nombres " $\pi$ " permet d'établir les facteurs d'échelle suivants (tous sont exprimés en fonction du facteur  $\lambda$  sur les longueurs) :

	grandeurs	symboles	facteurs d'échelle
1	section	A	$\frac{\alpha \Omega}{C} \lambda^{3/2}$
2	température	$\theta$	$\frac{1}{\alpha}$
3	module d'élasticité	E	$\rho \lambda$
4	temps	t	$\lambda^{1/2}$
5	courant	i	$\sqrt{\rho A \lambda}$
6	force	F	$\rho A \lambda$
7	différence de potentiel	V	$\sqrt{\rho A \lambda}$

TABLEAU 1. Facteurs d'échelle

Le troisième facteur caractérise l'incompatibilité à matériau identique.

### 6.3. MODELES PROPOSES

Le respect des sept facteurs d'échelle limite le choix du facteur sur les longueurs selon le type de matériau utilisé. On trouvera au tableau 2 les caractéristiques de quelques matériaux conducteurs susceptibles d'être utilisés.

Matériau (symb) caract.		Al	Cu	W	Au	Ag
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	2700	8960	19300	19300	10500
C	J/Kg°C	950	380	140	130	230
$\alpha$	10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	23,0	16,5	4,3	14,2	18,9
E	10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup>	7,2	11,0	35,0	7,3	7,2
$\Omega$	10 <sup>-8</sup> $\Omega \times m$	2,9	1,6	5,7	2,1	1,5

TABLEAU 2. Caractéristiques des matériaux

On en déduit que le facteur d'échelle sur les longueurs (qui s'obtient à partir des rapports  $\frac{E}{\rho}$ ) vaut au maximum 2,2 (modèle en cuivre d'un prototype en aluminium). L'amélioration de ce facteur grâce à une distribution de masses additionnelles de densité plus élevée ne peut guère porter la valeur au-delà de 2,5.

Il reste encore la possibilité de jouer sur le module d'élasticité indépendamment du matériau en remplaçant le câble par un ressort judicieusement calculé et qui fournirait un module d'élasticité apparent réduit dans le rapport voulu. Cette éventualité fut utilisée pour tester certains problèmes mécaniques de vibrations [186-187]. Dans le cas présent il faut cependant considérer le passage du courant qui produira, dans le cas du ressort, certains effets secondaires différents du conducteur filiforme.

Notamment les échauffements (longueur parcourue très différente de la portée) et surtout la compression du ressort (deux spires voisines du même ressort s'attireront) dont la valeur peut être quantifiée par la formule (i)

$$F_c = \int_S \frac{1}{2} \mu_0 H^2 ds$$

S étant la surface du cylindre formé par le ressort.  
ce qui nous donne (soit 200 spires par mètre, 30 A et un diamètre de 1 cm) environ

$$F_c \approx 0,71 \text{ N/m}$$

Soit 11 N pour une portée de 15 m; or la tension de pose à l'échelle est de l'ordre de 10 N (il s'agit d'un modèle que nous étudierons au ch. 7)

La solution palliative qui consisterait à introduire un fil conducteur dans le ressort ne respecterait pas l'effet de la température sur l'allongement du câble tendu. Ce qui précède nous conduit à devoir écarter cette solution.

#### 6.3.1. Méthodes approchées

Il existe quelques procédés classiques pour contourner l'incompati-

(i) CALVAER A. Electromagnétisme, fascicule 2 - Derouaux, Liège, page 14.45., 1972

bilité observée telle la segmentation temporelle (chaque période étant caractérisée par une partie seulement de l'ensemble des lois) et la relaxation (on néglige une loi qui a moins d'influence).

La fig. 1 montre l'évolution des quatre forces en présence lors d'un court-circuit (ce diagramme a pu être obtenu par décomposition numérique sur le premier cas expérimental étudié au chapitre 4).

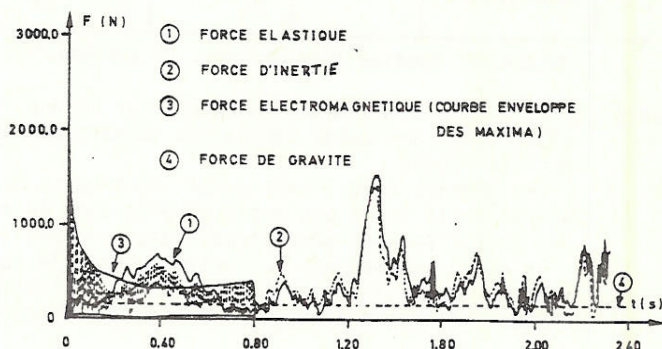


Figure 1

Allure du module des forces en jeu exprimée au noeud à mi-portée dans le premier cas expérimental du chapitre 4.

La segmentation temporelle n'est pas réalisable dans notre cas. En effet, l'intérêt recherché est de pouvoir "oublier" soit les forces élastiques soit les forces de gravité car leur respect simultané conduit à l'incompatibilité citée plus haut.

La relaxation d'une de ces lois doit donc être envisagée. Le non respect de l'échelle d'une force relaxée peut cependant accroître considérablement les écarts entre le comportement du prototype et celui du modèle car les deux forces en question sont présentes de manière intensive pendant tout le phénomène (fig. 1).

Nous allons nous attacher à qualifier l'effet d'une telle relaxation. Le tableau 3 donne les facteurs d'échelle dans les trois éventualités suivantes :

modèle A : exact (idem au tableau 1)

modèle B : relaxation de la gravité

modèle C : relaxation des forces élastiques

	grandeurs	symboles	modèles A	modèle B	modèle C
1	force	F	$\rho A l$	EA	$\rho A l$
2	courant	i	$\sqrt{\rho A l}$	$\frac{V E A}{\sqrt{E}}$	$\sqrt{\rho A l}$
3	temps	t	$\sqrt{l}$	$\sqrt{\frac{\rho}{E}} l$	$\sqrt{l}$
4	module élasticité	E	$\rho l$	-	-
5	température	$\theta$	$1/\alpha$	$1/\alpha$	$\frac{\rho}{E} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot l$
6	section	A	$\frac{\alpha \Omega}{C} l^{3/2}$	$\frac{\alpha \Omega}{C} \sqrt{\frac{E}{\rho}} l$	$\frac{\alpha \Omega}{C} \frac{E}{\rho} \sqrt{l}$

TABLEAU 3. Trois modèles réduits envisagés

Il nous est apparu intéressant d'examiner également les mêmes modèles tout en négligeant, pour chacun d'eux, le sixième "π" ce qui nous permettra le choix libre de deux facteurs d'échelle au lieu d'un : celui sur les longueurs et celui sur les sections.

Dans ce cas, le tableau 3 reste identique pour les quatre premières lignes, la dernière disparaît et l'on remplace la ligne 5 par :

	grandeurs	symboles	modèle A	modèle B	modèle C
5	température	$\theta$	$\frac{\Omega}{CA} \ell^{3/2}$	$\sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{\ell}{CA} \cdot \ell$	$\frac{\Omega}{CA} \cdot \ell^{3/2}$

TABLEAU 4. Modèles réduits sans le sixième "π"

Remarques : - le modèle B doit être abandonné car le non respect de la répartition des poids fausse les valeurs de départ, notamment la flèche.  
 - les modèles A et C sont quasi identiques, le module d'élasticité n'est pas mis à échelle dans le modèle C ce qui justifiera son comportement plus rigide.  
 - le choix indépendant du facteur d'échelle sur A et  $\ell$  n'est évidemment concevable que dans les limites des hypothèses, notamment l'absence de rigidité flexionnelle.

#### 6.4. TESTS NUMERIQUES

Nous avons choisi d'étudier le comportement du jeu de barres du poste de Langerbrügge que nous avons simplifié (absence de dérivations, portiques infiniment rigides) (fig. 2).

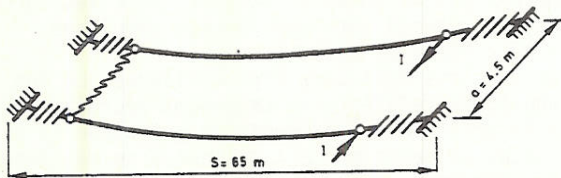


Figure 2

Structure étudiée en modèle réduit

Les données sont détaillées au tableau 5.

Les modèles A et C seront essayés avec deux facteurs d'échelles, à matériau identique.

Le premier cas ( $\ell \wedge 1,625$ ) ramène la portée de 65 à 40 m (soit le dispositif expérimental disponible à Laborelec). On peut espérer que la relaxation aura un effet mineur.

Le deuxième cas ( $\ell \wedge 13$ ) ramène la portée de 65 à 5m de manière à mettre en évidence la faisabilité d'un tel modèle réduit. Pour chaque cas on a envisagé la possibilité d'un choix libre du facteur d'échelle sur les sections, par exemple  $A \wedge 1$  et  $A \wedge \ell^2$ .

Nous avons effectué les calculs avec la méthode simplifiée du pendule (décrite au chapitre 5), compte tenu que nous nous attachons surtout à l'aspect qualitatif des modèles.

Le temps de calcul C.P.U. sur DEC SYSTEM 20 50 était d'environ quatorze secondes par cas (il aurait été d'environ deux heures avec le module CABLE du SAMCEF).

Au tableau 5, les données du prototype (colonne 1) et des modèles (colonnes 2 à 11) sont disposées dans la partie supérieure du tableau.



Les grandeurs de comparaison ont été choisies comme étant d'une part la valeur maximum de la tension mécanique et son instant d'apparition et d'autre part, pour chaque valeur extrême des débattements horizontaux et verticaux, on a repris la tension dans le câble et les instants correspondants. Ces grandeurs sont exprimées en fonction des modèles utilisés (tableau 5). Pour juger des modèles plus directement nous avons établi le tableau 6 qui reprend ces valeurs multipliées par les facteurs d'échelle respectifs, et les écarts en % par rapport au prototype.

Dans ce tableau 6, nous avons déjà éliminé les colonnes 6 et 7 du tableau 5 représentatives du facteur d'échelle 13 quand on néglige le sixième " $\pi$ ", en effet, le comportement est totalement différent du prototype et notamment, sur la période étudiée, la phase étudiée ne se déporte pas du côté des Y positifs, ce qui explique les zéros dans les colonnes 6 et 7 à l'emplacement de  $Y_{MAX}$ ,  $T_{MAX}$  et  $t_{YMAX}$ .

Même le premier écart n'est pas correct dans ce cas, surtout avec le modèle C où  $T_{MAX}$  atteindrait 124600 N (après avoir appliqué le facteur d'échelle). Ce fait est lié à l'importance de l'échauffement des câbles sur leur comportement (dans le cas étudié les 40000 A pendant 0,5s conduisaient à un accroissement de 100° de la température) or c'est justement cette loi qui est négligée dans ce modèle.

Le tableau 6 reprend également une esquisse de l'allure du mouvement (remise à l'échelle du prototype).

#### 6.4.1. Remarques d'ordre général quant au cas étudié :

- la tension initiale est multipliée par un facteur 10 lors du premier écart, ce fait est lié en partie à la flèche initiale (1,85 m) et à l'intensité du c-c qui est supposée parcourir l'ensemble du jeu de barres. Nous pouvons à ce titre faire référence à l'analyse paramétrique du chapitre 5.
- la distance entre phases (4,5 m) tend vers zéro pour 1,4s ( $Y_{MAX} = 2,75$  m). Nous ne nous préoccupons pas de ce fait vu l'aspect qualitatif de notre étude.
- le mouvement décrit par le câble à mi-portée est pratiquement circulaire, ce qui conduit à une faible intensité de coup de fouet.

#### 6.4.2. Discussion des résultats

6.4.2.1. Si l'on ne tient pas compte du sixième " $\pi$ ", c'est-à-dire si le facteur sur les sections est libre, on constate que :

- le modèle A conduit, même pour un faible facteur d'échelle ( $\lambda \wedge 1,625$ ), à des erreurs non systématiques qui peuvent atteindre 15 à 30% en valeur absolue, principalement sur les tensions, sauf sur le premier écart qui est correctement évalué.
- les écarts croissent et le phénomène est accéléré quand on diminue le facteur d'échelle sur la section de  $\lambda^2$  à l'unité
- le modèle C montre la même tendance que le modèle A avec des écarts plus marqués (jusqu'à 50%) et pratiquement sur toutes les valeurs (déplacements, tensions, instants), néanmoins l'allure reste acceptable.

Les grands facteurs d'échelle ( $\lambda \wedge 13$ ) ne sont plus repris au tableau 6 car ils modifient le mouvement d'une manière inacceptable (tableau 5).

6.4.2.2. Si l'on tient compte du sixième " $\pi$ ", les modèles A sont exacts, ce qui peut se vérifier au tableau 6 quel que soit le facteur d'échelle. Le modèle C, qui conserve le module d'élasticité du prototype se comporte assez mal quel que soit le facteur d'échelle. Il est remarquable de constater qu'il n'y a aucune amélioration p.r. au même modèle traité sans le sixième " $\pi$ " (facteur 1,625 sur les longueurs).

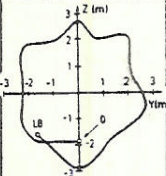
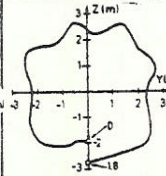
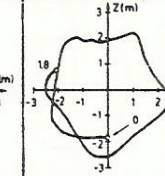
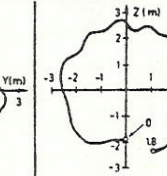
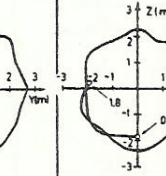
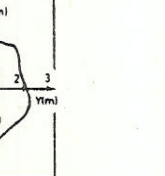




		GRANDEURS DE COMPARAISONS												(à multiplier par les facteurs d'échelle : voir tableau 6)											
tension Max :	$T_{MAX}$	45050.	10530.	27770.	11480.	29650.	23.2	56.7	13350.	23260.	74.	1070.	$T_{MAX}$												
Instant :	$t_{MAX}$	0.22	0.17	0.17	0.14	0.15	0.06	0.09	0.17	0.15	0.06	0.06	$t_{MAX}$												
dépl. horiz.	$V_{MAX}$	2.75	1.68	1.55	1.7	1.42	0	0	1.69	1.49	0.21	0.15	$V_{MAX}$												
et grandeurs	$T_{VMAX}$	34730.	6430.	21470.	5725.	15290.	0	0	10180	12140	56	398	$T_{VMAX}$												
correspond	$t_{VMAX}$	1.37	1.07	0.889	1.196	0.94	0	0	1.07	0.94	0.38	0.325	$t_{VMAX}$												
MAX et min.	$V_{min.}$	-2.33	-1.55	-1.56	-1.60	-1.41	-0.30	-0.28	-1.43	-1.34	-0.18	-0.15	$V_{min.}$												
$V, Z$ en m.	$T_{Vmin.}$	25240.	6760.	20765	8960.	16210.	21	54	7460.	10510.	39.	752.	$T_{Vmin.}$												
$T$ en N.	$t_{Vmin.}$	0.275	0.352	1.34	0.31	1.348	0.122	0.138	0.216	0.284	0.077	0.073	$t_{Vmin.}$												
$t$ en s.	$Z_{MAX}$	2.73	1.71	1.38	1.67	1.41	0.22	0.22	1.68	1.44	0.21	0.15	$Z_{MAX}$												
dépl. vert.	$T_{ZMAX}$	25850	5948	14670	4028	11120.	13	4.1	7715.	7990.	42	154	$T_{ZMAX}$												
et grandeurs	$t_{ZMAX}$	0.795	0.612	0.632	0.668	0.548	0.348	0.327	0.62	0.54	0.22	0.173	$t_{ZMAX}$												
correspond.	$Z_{min}$	-2.89	-1.67	-1.61	-1.46	-1.49	-0.18	-0.18	-1.78	-1.40	-0.22	-0.15	$Z_{min}$												
MAX et min.	$T_{Zmin}$	41400.	2420.	25600.	888.	22100.	20	45	12320.	9650.	68.	425.	$T_{Zmin}$												
	$t_{Zmin}$	1.65	1.412	1.112	1.412	1.144	0.051	0.023	1.29	1.16	0.457	0.407	$t_{Zmin}$												
METHODE DE CALCUL	Masse Kg	192,5	21,5	56,9	21,5	56,9	0,042	>>	27,5	44,65	0,152	1,973	Masse pendule												
FEUILLE	coeff. °C/S	200	325	123	325	123	2600	>>	255	157	721	55,5	coeff. échauff												
	Pas Tps 10 <sup>-3</sup> s	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,275	0,275	0,8	0,8	0,275	0,275	pas de temps												
	$t_{MAX} \left( \frac{Q_{MAX}}{Q_0} \right)$	100°	127,5	48,2	127,5	48,2	361	361	87,8	61,5	100	7,7	$Q_{MAX} - Q_0$												
N° répétées colonnes		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11													

TABLEAU 5 (suite)  
Grandeurs de comparaisons



Sans le sixième "π"									
l = 1,625									
	Proto- type	MODELE A				MODELE C			
		A = l <sup>2</sup>	écarts %	A = 1	écarts %	A = l <sup>2</sup>	écarts %	A = 1	écarts %
T <sub>MAX</sub>	45050.	45180.	0	45130.	0	49260.	+ 9%	48180.	+ 7%
t <sub>MAX</sub>	0.22	0.22	0	0.22	0	0.18	- 18%	0.19	- 13%
Y <sub>MAX</sub>	2.75	2.73	- 1%	2.52	- 8%	2.76	0	2.31	- 16%
T <sub>y<sub>max</sub></sub>	34730.	27590.	- 20%	34890.	0	24566.	- 29%	25870.	- 25%
t <sub>y<sub>max</sub></sub>	1.37	1.36	- 1%	1.13	- 17%	1.52	+ 11%	1.20	- 12%
Y <sub>min</sub>	- 2.33	- 2.52	+ 8%	- 2.53	+ 8%	- 2.6	+ 11%	- 2.29	- 2%
T <sub>y<sub>min</sub></sub>	25240.	29000.	+ 15%	33740.	+ 34%	38450.	+ 52%	26340.	+ 4%
t <sub>y<sub>min</sub></sub>	0.275	0.45	*	1.7	*	0.39	+ 41%	1.7	*
Z <sub>MAX</sub>	2.73	2.78	+ 2%	2.24	- 18%	2.71	- 2%	2.29	- 16%
T <sub>z<sub>MAX</sub></sub>	25850.	25520.	- 1%	23840.	- 8%	17280.	- 33%	18070.	- 30%
t <sub>z<sub>MAX</sub></sub>	0.795	0.78	- 2%	0.80	0	0.85	- 6%	0.70	- 12%
Z <sub>min</sub>	- 2.89	- 2.71	- 6%	- 2.61	- 10%	- 2.36	- 18%	- 2.42	- 16%
T <sub>z<sub>min</sub></sub>	41400.	10380.	* *	41600.	0	3810.	* *	35910.	- 13%
t <sub>z<sub>min</sub></sub>	1.65	1.8	* *	1.42	- 14%	1.8	* *	1.46	- 11%
									

TABEAU 6 (suite)  
Grandeurs de comparaisons multipliées par les facteurs d'échelle  
modèles sans le sixième π

Un facteur d'échelle de treize sur les longueurs conduit à un comportement inadmissible du modèle C lié à la raideur du câble qui est treize fois plus importante que celle correspondant au modèle.

6.4.2.3. En résumé, le cas étudié ne peut être représentatif de toutes les possibilités, néanmoins, malgré la géométrie simple, les écarts sont inadmissibles pour les facteurs d'échelle de l'ordre de 10. Le premier écart est la seule valeur susceptible d'être évaluée avec une bonne précision (10%), les autres quantités (coup de fouet, rapprochement des phases) ne peuvent être approchées d'une manière suffisamment réaliste.

## 6.5. CONCLUSIONS

L'utilisation de modèles réduits pour l'étude du comportement des conducteurs souples présente des restrictions importantes :

- Il n'existe pas de modèle physique simple permettant de prendre en compte l'ensemble des lois qui guident le phénomène sauf dans un cas très particulier (paragraphe 6.3).

- Le modèle le plus réaliste s'obtient en négligeant les forces élastiques dans l'établissement des facteurs d'échelle. Les tableaux 3 et 4 donnent ces facteurs d'échelle.

- Les facteurs d'échelle admissibles dans ce cas doivent rester faibles (inférieurs à 2) ce qui requiert des essais coûteux sur des installations spécialement prévues à cet effet (les intensités de courant restent très élevées). Néanmoins, une structure de base peut servir à l'étude de nombreux postes.

- Les meilleurs résultats seront obtenus pour des mouvements pendulaires (pas de coup de fouet) et des échauffements faibles. Le facteur d'échelle sur les sections peut être choisi librement, par exemple l'unité.

- Si le mouvement n'est pas pendulaire, on ne pourra pas se fier aux distances entre phases obtenues par le modèle.

- Un cas d'application idéal du modèle C va se présenter au chapitre 7 (faisceaux découplés) dans le cas d'une disposition horizontale des sous-conducteurs. Effectivement, les forces élastiques n'interviennent pas dans le comportement comme il sera montré dans le chapitre en question.

