

Chapitre 4

CAS D'APPLICATION REPRESENTATIFS DES PROBLEMES RENCONTRES DANS LA PRATIQUE

4.1. CONSIDERATIONS GENERALES

Nous avons développé au cours des chapitres précédents, un modèle mathématique permettant l'étude du comportement des câbles tendus soumis en régime dynamique transitoire à de grands déplacements.

Un logiciel découlant de ce modèle a été introduit dans SAMCEF [171].

L'utilisation de SAMCEF permet de disposer notamment d'autres types d'éléments finis tels que les "poutres" qui serviront à discrétiser, par exemple, les structures d'ancrage.

Une étape importante reste à franchir: le passage de la structure réelle au modèle éléments finis.

Dans ce passage on distinguera principalement quatre niveaux de difficultés :

- 1.- Elaboration des données complètes nécessaires au modèle (caractéristiques des conducteurs, des ancrages, du court-circuit, etc...)

- 2.- Choix de la discrétisation en "éléments finis" (degré, nombre d'éléments, type, etc...)

- 3.- Choix de la stratégie du calcul (schéma d'intégration, pas de temps, options d'impression et d'archivage, remise à jour des raideurs et des forces, etc...)

- 4.- Construction des fichiers de données relatives aux points 2 et 3, compatibles avec le logiciel.

Après cette étape et l'obtention des résultats, le module de post-traitement POSTFAC [172] du SAMCEF sera utilisé pour le dépouillement graphique des résultats. Une sortie sur table traçante permettant la lecture plus aisée et à l'échelle désirée a été mise au point .

4.1.1. Elaboration des données

Cette première difficulté dépend du type de problème.

4.1.1.1. Les comparaisons calculs-expériences.- Dans ce cas, il est impératif de déterminer avec un maximum de précision et si possible avec redondance, l'ensemble des données caractéristiques du modèle (géométrie, élasticité des divers composants, tension dans les câbles, longueur des dérivations, etc...). Il sera souvent préférable d'effectuer des essais statiques et dynamiques sur site pour déterminer, par exemple, la validité des encastresments et le spectre des fréquences des systèmes d'ancrage (portiques, isolateurs supports, etc...). Un travail parallèle entre l'établissement du modèle mathématique et les essais en vraies grandeurs permettra d'éviter tout oubli. Les premiers cas (paragraphe 4.2) étudiés ci-après ont été traités de cette manière.

4.1.1.2. La prévision à moyen terme.- Il s'agit de vérifier si les contraintes supplémentaires ayant pour origine l'augmentation de l'intensité du courant de court-circuit sont susceptibles d'être supportées par les structures existantes. Les cas étudiés aux paragraphes 4.3.1 et 4.3.3 ci-après en sont des exemples.

4.1.1.3. Le dimensionnement de nouvelles structures.- Ce problème se pose à la conception d'un nouveau type de structure. Le paragraphe 4.3.2 en étudie un exemple.

Dans les deux derniers cas il est difficile voire impossible d'effectuer des essais sur la structure à calculer, auquel cas nous ferons des hypothèses logiques dans le sens de la sécurité.

Ces hypothèses seront guidées grâce à l'étude paramétrique qui sera exposée au chapitre 5.

Les données les plus malaisées à obtenir sont probablement d'une part la rigidité extensionnelle du câble et des armements et d'autre part la raideur réelle des systèmes d'ancrages.

4.1.1.4. La rigidité des câbles et des armements.- Concernant les câbles cette donnée n'est pas connue avec précision. En effet, la rigidité des câbles varie avec le toronnage, le vieillissement du câble et son passé [152]. Le paragraphe 4.2 présentera des mesures précises du module de Young apparent pour deux sections différentes (105 et 324 mm² de cuivre) et le module de Young pour un seul brin de conducteur.

Il est cependant apparu, sur base de l'expérience acquise, que la connaissance du module de Young apparent ne doit pas être connue avec grande précision (vingt pour cent d'erreurs sont tolérables). Ce fait peut être physiquement justifié par son action sur la raideur réelle, intervenant dans les forces élastiques, et qui fait intervenir le produit [dans le cas particulier étudié à l'annexe 3]

$$\frac{EA}{L_0} \cdot g(f)$$

où L_0 est la longueur du câble, E le module d'élasticité, A la section et $g(f)$ une fonction du second degré non linéaire de la flèche, (dans le cas particulier étudié).

Une compensation existerait donc entre une faible variation du module d'élasticité et une variation bien plus faible (vu le degré de la fonction g) de la flèche, en sens opposé; de sorte que l'allure générale et les contraintes restent transparentes à ces effets.

On peut faire la même remarque à propos des armements, où l'erreur a encore une influence moindre surtout quand la portée est longue. En général, le produit "EA" des armements est voisin de celui du câble, voire inférieur.

4.1.1.5. La raideur des ancrages.- Elle a une importance nettement plus significative que leur inertie. Dès lors, le contenu fréquentiel du modèle de ces structures pourra être simplifié sauf dans quelques cas particuliers.

Ce fait est physiquement lié aux oscillations forcées basses fréquences (de l'ordre du Hz) imposées par le mouvement des câbles.

Les premières fréquences des portiques se situent en effet aux alentours de 5 Hz, elles sont fonction de la hauteur des colonnes, de la rigidité des membrures et des masses de fixation. Les modes supérieurs conduisent rapidement à des fréquences de l'ordre de 20 à 30 Hz (deuxième fréquence des colonnes par exemple) dès lors l'excitation de ces fréquences est très faible, ce qui explique la remarque précitée. Il est évident que les modes symétriques aux alentours de 50 Hz et 100 Hz doivent être évités.

Les structures d'ancrages peuvent être constituées de treillis articulés ou soudés; il est évident que la structure sera obligatoirement ramenée à un nombre restreint de degrés de liberté, par les méthodes classiques [151, 155, 171], en tenant compte des remarques ci-dessus.

Une difficulté importante subsiste quant à la connaissance de la raideur effective qui peut être influencée par la validité des encastrements. Un essai statique permettra de lever cette indétermination.

Enfin, il convient de signaler le cas particulier des isolateurs supports situés aux ancrages des dérivations. Cette structure sera en effet soumise à une excitation à caractère impulsionnel (quand la dérivation se tend, il y correspond un à-coup). Le modèle de ces

supports doit donc posséder un contenu fréquentiel beaucoup plus riche que les ancrages du jeu de barres. Néanmoins, le déplacement en tête de ces isolateurs supports reste faible et en tout cas d'influence nulle sur le comportement général; aussi nous suggérons de calculer les contraintes dans ces isolateurs dans une étape séparée du calcul général. De cette manière, le modèle de l'isolateur peut être affiné sans alourdir le nombre de degrés de liberté du modèle de l'ensemble de la structure. Ce second calcul pourra d'ailleurs faire l'objet d'une étude linéaire (module REPDYN du SAMCEF).

4.1.2. Discrétisation éléments finis

Ce choix sera guidé par l'expérience acquise lors des différents essais, il y a évidemment un optimum entre la précision désirée et le temps de calcul. Nous en reparlerons à l'occasion des cas étudiés.

4.1.3. Stratégie du calcul

Comme au paragraphe précédent, l'expérience nous guidera vers le choix optimal et nous en discuterons dans les paragraphes suivants.

4.1.4. Fichiers des données

La construction du fichier relatif au paragraphe 4.1.2. a nécessité la mise au point d'un programme de génération automatique afin d'une part de faciliter la rentrée des nombreuses données nécessaires au traitement du modèle, et d'autre part de fournir au programme de calcul une structure modélisée compatible avec les hypothèses (notamment se pose le problème du calcul de la position de référence dont il est question au chapitre 3, paragraphe 6). Ce programme génère également les codages nécessaires au calcul des forces d'origine électromagnétiques de manière à faciliter au maximum son calcul lors de l'étude dynamique [159]. Les coefficients de l'équation d'échauffement doivent également être calculés. L'annexe 1 donne quelques détails à propos de ce programme. Ce logiciel PRELEC, qui comporte environ 3000 instructions Fortran, permet de générer n'importe quel type de structure en câbles tendus, y compris leurs ancrages.

La construction du fichier relatif au paragraphe 4.1.3. est manuelle, il comporte environ une vingtaine de données. Il définit notamment le pas de temps, le schéma d'intégration, le type de remise à jour, etc...

La procédure requise pour l'entrée des données est reprise à la référence [169].

4.1.5. Présentation des cas étudiés

Il existe quelques publications relatives à certains cas précis, quelquefois avec résultats expérimentaux [146 à 150] mais les données sont en général incomplètes sinon absentes. Nous avons préféré choisir nos propres cas types en étroite liaison avec des organismes belges et étrangers intéressés, notamment Electrobél, Laborelec et EDF.

Les cas que nous présentons sont représentatifs, à notre avis, des problèmes rencontrés dans la pratique. La première structure étudiée est une configuration de poste 150 kV qui a été reproduite en vraies grandeurs à Laborelec. Toutes les données ont pu être mesurées avec précision, nous y confronterons les calculs numériques, l'influence de la rigidité des ancrages et la présence des dérivations sont incluses dans les calculs. (3 cas de calcul) (paragraphe 4.2). La deuxième structure étudie le comportement d'un jeu de barres avec mécanisme à contrepoids, de mise sous contraintes mécanique. (2 cas de calcul) (paragraphe 4.3.1). La troisième structure est une configuration de poste 400 kV EDF, les efforts dans les dérivations seront étudiés (2 cas de calcul) (paragraphe 4.3.2). La quatrième structure est une configuration particulière de ligne 150 kV, nous étudions le comportement de la descente au poste de Tihange (ligne Gramme-Tihange).

La configuration gauche des conducteurs et l'importance de la dénivellation conduiront à des résultats intéressants pour ce cas complexe en apparence (paragraphe 4.3.3.).

4.2. COMPARAISONS EXPERIMENTALES

4.2.1. Premier cas LABORELEC (30 kA; 0,8s; 324 mm²) [153, 156, 157, 158, 160, 161, 165, 168, 170]

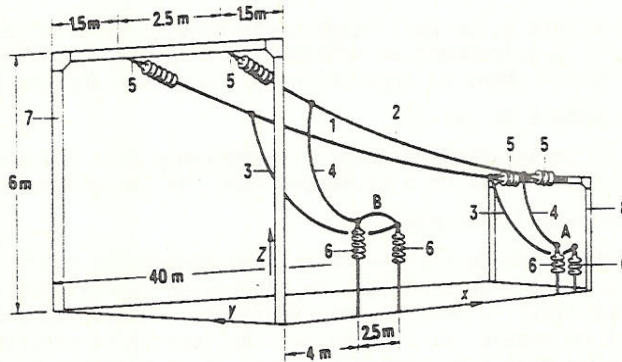


Figure 1

Section d'un poste extérieur 150 kV, testée à LABORELEC.

A : amenée de courant

B : connexion de court-circuit

- 1...4 conducteur de 324 mm² composé de 19 brins de cuivre
 1. portée EST
 2. portée OUEST
 3. dérivation EST de 5,6 m de longueur
 4. dérivation OUEST de 4,0 m de longueur
5. armement se composant d'un dispositif de 1,4 m de longueur, 8Kg et EA=18.10⁶N; et d'une chaîne d'isolateurs de 1,54 m de longueur, 52,3 Kg et EA=30.10⁶N.
6. isolateurs supports C8-750 (norme CEI) sur fondation rigide de 2,3m de hauteur
7. portique NORD colonnes HE-B260 (EURONORM 53-62)
8. portique SUD traverse HE-B24u (masses de 62,2 Kg aux croisements colonnes-traverses).

Les détails de l'établissement du modèle sont repris à la référence [160]. Nous épinglerons les principales difficultés rencontrées.

4.2.1.1. La mesure du module d'élasticité du câble.- Cette mesure délicate a été effectuée à l'Université de Liège (i). La valeur pour un brin du câble :

$$E_{\text{brin}} \approx 14 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

Celui du câble (19 brins toronnés) :

$$E_{\text{câble}} \approx 12 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

Ce qui donne pour la rigidité extensionnelle du câble :

$$EA \approx 39 \cdot 10^6 \text{ N}$$

(i) Mesure effectuée par M. BRAHAM, Service de Mécanique des matériaux et stabilité des constructions, Université de Liège.

La même grandeur, mais correspondant à l'armement, conduisait à des valeurs similaires (indiquées dans la légende de la fig. 1).

4.2.1.2. Le respect des caractéristiques statiques et dynamiques des portiques.- Bien qu'identiques théoriquement les raideurs apparentes (mesurées) présentaient des écarts de l'ordre de 30% par rapport aux valeurs théoriques. Cet écart, particulièrement élevé est lié à la nature des encastresments. La structure Laborelec avait en effet été établie sur un remblai récent. Nous avons tenu compte de cet effet en ajustant les rigidités des colonnes du modèle.

Moyennant cet ajustement et le respect des masses importantes (62 kg) des dispositifs de fixation colonne-traverse, le contenu fréquentiel du modèle est quasi identique à celui des essais sur site [160].

4.2.1.3. Données du problème.- Les tableaux 1 et 2 reprennent l'ensemble des données nécessaires au calcul (il faut y ajouter les caractéristiques géométriques de la fig. 1).

Grandeurs	CABLES		PORTIQUES			ANCRAGES		
	Symb./unit.	(Cuivre)				a) interface portique	b) chaîne isolateur	
Section	A	m ²	324. 10 ⁻⁶	a) colonnes 11.8 10 ⁻³	b) traversés 10.6 10 ⁻³	EA=18 10 ⁶	30. 10 ⁶	
Module Young	E	N/m ²	12. 10 ¹⁰	21. 10 ¹⁰	21. 10 ¹⁰	-	-	
Dilat. therm.	α	°C ⁻¹	16.8 10 ⁻⁶	-	-	-	-	
Masse volum.	ρ	Kg/m ³	8920.	7860.	7860.	-	-	
Pds. p.u. long.	p	N/m	28.35	913.	817.	56.	533.	
Chal. spécif.	C _m	J/Kg°C	389.	-	-	-	-	
Résistivité (à 20°C)	ρ ₀	Ω.m	0.017 10 ⁻⁶	-	-	-	-	
Coef. variation. de ρ ₀ avec t ^c	K		0.0039	-	-	-	-	
Coef. convection	h _c	J/m ² s°C	35.	-	-	-	-	
Rigidité flexion. max.	EI _{MAX}	Nxm ²	0.	NORD : 22.3 10 ⁶	SUD-OUEST : 18.7 10 ⁶	SUD-EST : 20.3 10 ⁶	23.6 10 ⁶	0.
Rigidité flexion. min.	EI _{MIN}	Nxm ²	0.	10.7 10 ⁶	"	"	8.2 10 ⁶	0.
Rigidité torsionnelle	GI _t	Nxm ²	0.	105. 10 ³	"	"	89. 10 ³	0.

* Cette valeur est à ajuster en respectant la masse totale donnée à la fig. 1 et la valeur de A - TABLEAU 1

Grandeurs	Symb.	unit.	Valeurs
Valeur efficace	I _{eff}	A	29400.
Valeur de lère crête	I _{1cr}	A	72700.
Durée du c-c	t _{c-c}	s.	0.8
c ^{te} de temps	τ	s.	0.033

TABLEAU 2. Données électriques du premier cas LABORELEC (défaut biphasé-isolé)

N.B. Ces valeurs correspondent à une asymétrie $\frac{I_{1cr}}{I_{eff}} = 2,47$

4.2.1.4. Les conditions initiales.- Elles étaient les suivantes :
température ambiante : 14°
initiale des câbles : 15,8°

tensions mécaniques : 7850 N à l'EST (plan y=5,5m)
 7650 N à l'OUEST (plan y=0m)
 flèches correspondantes : 0,95 m à l'EST
 0,965 m à l'OUEST

4.2.1.5 Choix de la discrétisation.- Ce choix est guidé par des considérations pratiques (changement d'orientation, matériaux différents, points caractéristiques tels les attaches des dérivations au jeu de barres, minimisation de la largeur de front, etc...) et l'expérience (les éléments du câble du second degré sont préférables aux autres degrés, deux éléments maximum par dérivation car c'est surtout le câble principal qui guidera les à-coups, etc...)

La structure discrétisée selon ces critères comporte 24 éléments de poutre (portiques et étriers), 4 éléments "câble" du 1er degré (armement intermédiaire) et 24 éléments "câble" du 2ème degré.

Soient 52 éléments, 76 noeuds et 270 degrés de liberté.

4.2.1.6. Les conditions aux limites.- Encastresments à la base des portiques et des arrivées des dérivations sur supports (isolateurs supports non discrétisés).

4.2.1.7. Calcul de la position de référence du modèle.- Après quelques itérations on trouve pour une longueur initiale non déformée de 33,760m (câble du jeu de barres) les tensions mécaniques et flèches (en position déformée) suivantes :

à l'EST 7900N avec une flèche de 0,945 m

à l'OUEST 7640 N avec une flèche de 0,956 m.

que l'on adopte vu la concordance avec les valeurs initiales de la structure réelle.

4.2.1.8. Résultats du calcul dynamique transitoire.- Ce premier cas a été traité avant la mise au point des diverses possibilités des schémas d'intégration et de remise à jour de la raideur. Nous avons utilisé le schéma du trapèze ($\beta = \frac{1}{4}$, $\gamma = \frac{1}{2}$) avec remise à jour du type Newton-Raphson une fois par pas de temps. Le pas de temps était de 2,5 millièmes de seconde et le temps d'observation de 2,4 secondes environ.

Cette étude a été effectuée sur IBM 370/158 en 6 heures de temps CPU et a exigé une mémoire de 368 kbytes. Soit environ $8,4 \cdot 10^{-2}$ seconde par pas et par degré de liberté.

Les fig. 2 à 7 montrent les courbes expérimentales et numériques pour les grandeurs mesurées lors des essais.

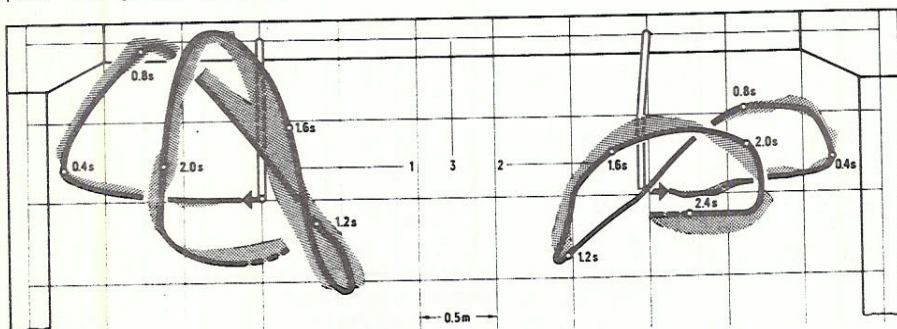


Figure 2

Premiers cas LABORELEC : 30 kA; 0,8 s; 324 mm². Déplacement des conducteurs au milieu de la portée (plan YZ). Courbes expérimentales avec bandes de divergence du résultat numérique.

1. conducteur OUEST

2. conducteur EST

3. portique NORD à l'arrière plan

On notera la concordance remarquable des courbes calculées et mesurées (écart maximum de 10% et en sécurité sur les valeurs maximales.)

La dissymétrie des courbes EST et OUEST se justifie uniquement par la présence de dériviatives plus courtes.

Le coup de fouet vers 1,3 s conduit à l'effort maximal (3 fois la valeur initiale).

Les courbes 4 et 6 sont pratiquement superposables à un facteur d'échelle près, cela est dû à l'excitation synchrone et symétrique des 2 phases et à la quasi-absence des effets d'inertie au niveau du portique.

Ces courbes sont plus largement discutées en [161].

Figures 3 à 7

Comparaisons des courbes expérimentales (traits pleins) et numériques (traits pointillés) sur quelques grandeurs, en fonction du temps.

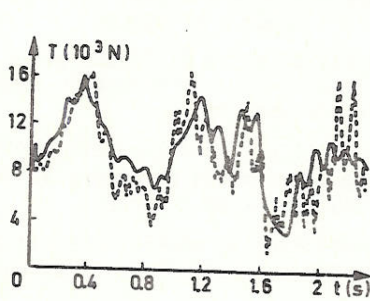


Figure 3
tension mécanique dans le câble EST

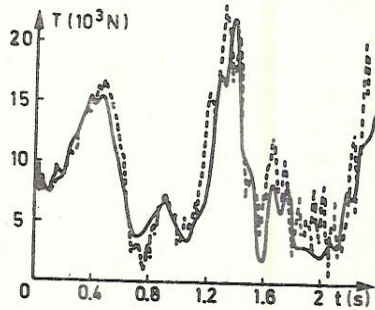


Figure 4
tension mécanique dans le câble OUEST

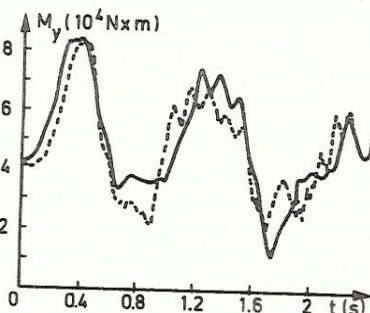


Figure 5
moment de flexion à la base de la colonne NORD-EST

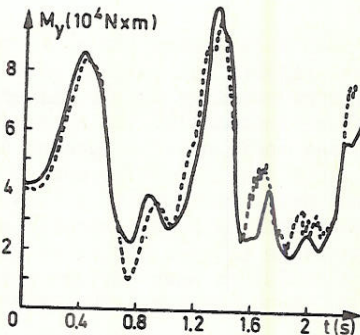


Figure 6
moment de flexion à la base de la colonne NORD-OUEST

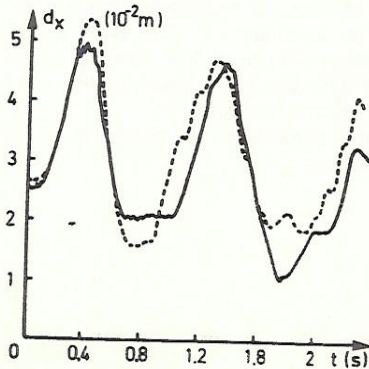


Figure 7
déplacement selon X, du point d'ancrage de la phase EST au portique NORD.

4.2.2. Deuxième cas LABORELEC (30 kA; 0,8 s; 324 mm²; avec hauban)[164]

Les données sont identiques au premier cas examiné, excepté que l'on a attaché un "hauban" à mi-portée EST. En fait, il s'agit d'une dérivation supplémentaire, isolée électriquement du jeu de barre et reliée à un point fixe de coordonnées (X=20m; Y=2,73m; Z=0,925m) (système d'axes de la fig. 1). Le hauban est constitué d'un isolateur (34 cm de longueur et 4,1 kg), d'un câble identique au jeu de barre (3,62 m de longueur), d'une pince d'ancrage (6,7 kg) et enfin d'une bielle de mesure (0,485 m de longueur et 1,7 kg) reliée directement au point d'ancrage. Cette dernière a permis le relevé de la tension mécanique dans cette dérivation en fonction du temps.

4.2.2.1. Les conditions initiales.- Elles étaient modifiées par rapport au cas précédent :

tension mécanique : 8630 N à l'EST (présence du
6870 N à l'OUEST hauban)

et les flèches correspondantes : 1,09 m à l'EST
0,965 m à l'OUEST

On notera au passage l'incompatibilité entre la flèche et la tension à l'Ouest: la flèche est identique au cas précédent (paragraphe 4.2.1.4.) pour une tension initiale modifiée.

4.2.2.2. Choix de la discrétisation.- Elle a été légèrement modifiée et complétée. Cette fois, elle comprend 16 éléments de poutre et 34 éléments de câble, soit 78 noeuds et 249 degrés de liberté.

4.2.2.3. Calcul de la position de référence du modèle.- Ce cas a été longuement étudié sur le plan numérique au chapitre 3, paragraphe 6. On obtient finalement :

à l'EST 8660 N avec une flèche de 1,124 m
à l'OUEST 6790 N avec une flèche de 1,066 m

On voit apparaître au vu des flèches un écart de l'ordre de 5 cm par rapport aux valeurs expérimentales. La non correspondance tension-flèche entre le modèle mathématique et la réalité confirme l'existence d'une incompatibilité au niveau des données expérimentales. Ce que nous avons indiqué au paragraphe 4.2.2.1.

Ces écarts modifieront le comportement du jeu de barres dont le mouvement sera amplifié [164] mais n'influencent que très peu le comportement du hauban auquel nous nous attachons exclusivement dans ce deuxième cas (le hauban se tend pendant le mouvement de répulsion du câble EST et nous voulons comparer les efforts à l'ancrage calculés par le modèle avec ceux relevés lors des essais).

4.2.2.4. Résultats du calcul dynamique transitoire.- Un premier calcul a été effectué en ne tenant compte que de la composante continue de la force électromagnétique.

Nous avons également utilisé le schéma du trapèze. Le pas de temps a été choisi égal à deux millièmes de seconde et même à un millième lors du coup de fouet. Le temps d'observation a été limité à 1,7 s. Cette étude a été effectuée sur IBM 370/158 en 7 heures CPU soit environ 0,10 seconde par pas et par degré de liberté.

La figure 8 trace les courbes expérimentales et numériques de l'évolution de la tension dans le hauban.

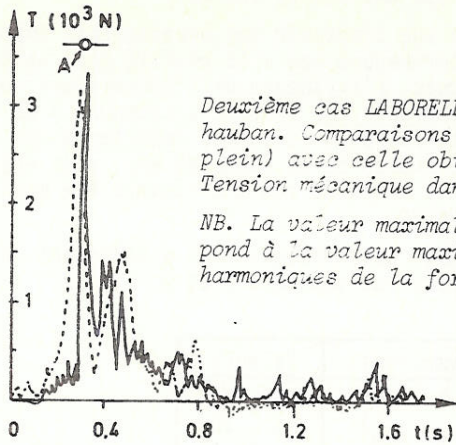


Figure 8

Deuxième cas LABORELEC : 30 kA; 0,8s.; 324 mm², avec hauban. Comparaisons de la courbe expérimentale (trait plein) avec celle obtenue par le calcul (trait pointillé) Tension mécanique dans le hauban en fonction du temps.

NB. La valeur maximale repérée par la lettre A correspond à la valeur maximale calculée avec les composantes harmoniques de la force.

Cette fois encore une excellente concordance apparaît. Cette comparaison nous permet d'extrapoler la validité des calculs à l'évolution de la tension dans les autres descentes et la figure 9 reprend l'évolution en fonction du temps de la tension axiale à la base de la dérivation NORD-OUEST.

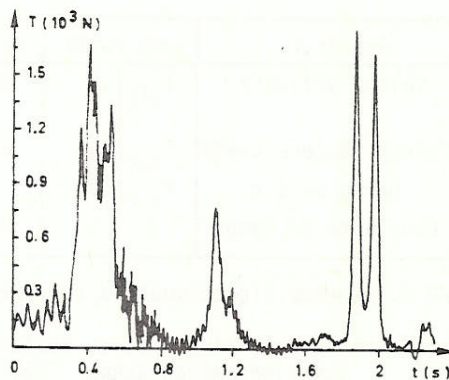


Figure 9

Allure de l'évolution de la tension mécanique calculée dans une dérivation (NORD-EST), en fonction du temps.

L'aspect impulsionnel de cette valeur est évidemment lié aux extensions brusques de la dérivation, liées au mouvement du câble de phase et au coup de fouet dans la dérivation elle-même.

La valeur maximale indiquée sur la figure 8 correspond au même cas, étudié avec toutes les composantes de la force électromagnétique. On voit, dans ce cas particulier, que l'option de la composante continue présente un écart significatif par rapport à la composante réelle (environ 10%) mais il faut signaler que le maximum est très proche du début de l'observation du phénomène, justement dans les zones à maxima beaucoup plus importants de la force électromagnétique réelle par rapport à sa composante continue. Ceux-ci correspondent à un apport d'énergie plus important au câble sur une brève durée ($\approx 0,3$ s). On notera enfin que l'effort maximal dans le hauban reste d'un ordre de grandeur suffisamment faible (≈ 3500 N) à ce niveau de court-circuit pour ne pas craindre des conséquences fâcheuses sur les appareillages au sol où, en pratique, il pourrait être relié.

4.2.3. Troisième cas LABORELEC (30 kA; 0,5 s; 105 mm²)

Cet essai a été programmé en vue d'obtenir des débattements importants du jeu de barres. Il ne correspond pas à la réalité pour un tel niveau de courant de court-circuit. L'influence de l'échauffement du câble prendra une ampleur considérable car il faut s'attendre à un accroissement de la température environ 9 fois plus importante que lors du premier essai, pour une même intensité et durée du c-c, soit environ 270°C au lieu de 30°C. En fait la durée du court-circuit a été modifiée pour limiter l'échauffement à 200°C.

4.2.3.1. Les données du problème.- Les tableaux 3 et 4 indiquent les quelques modifications par rapport aux tableaux 1 et 2 (paragraphe 4.2.1.3.).

Grandeurs	Symb./unit.	Valeurs
Section	A m ²	105. 10 ⁻⁶
Module de Young (i)	E N/m ²	9,7 10 ¹⁰
Poids par unité de longueur	P N/m	9,22

TABLEAU 3. Données mécaniques du troisième cas LABORELEC

Grandeurs	Symb./unit.	Valeurs
Valeur efficace	I _{eff} A	28800
Valeur de lère crête	I _{1cr} A	65350
Durée du c-c	t _{c-c} s	0,5
Constante de temps	τ s	0,019

TABLEAU 4. Données électriques du troisième cas LABORELEC

4.2.3.2. Les conditions initiales.- Elles étaient les suivantes :

tensions mécaniques : 2590 N à l'EST
2550 N à l'OUEST

flèches correspondantes : 1,24 m à l'EST
1,24 m à l'OUEST

4.2.3.3. Choix de la discrétisation.- La discrétisation utilisée comprenait 83 noeuds, 54 éléments et 237 degrés de liberté.

4.2.3.4. Calcul de la position de référence.- En vingt itérations du type Newton-Raphson on obtient l'équilibre statique suivant :

à l'EST 2590 N avec une flèche de 1,244 m
à l'OUEST 2550 N avec une flèche de 1,246 m.

Ces valeurs sont pratiquement identiques aux relevés effectués lors des essais.

4.2.3.5. Résultats du calcul.- Ce troisième cas a été étudié par divers schémas d'intégration et a été longuement discuté au chapitre 3, paragraphe 3.3.3. Nous reprendrons dans le cadre de ce chapitre, la présentation des résultats obtenus par le schéma "H.H.T." pour une valeur $\alpha = 0,3$ du paramètre associé.

(i) mesure effectuée par M. BRAHAM; Service de Mécanique des matériaux et stabilité des constructions; Université de Liège

Nous n'avons considéré que la composante continue de la force. Pour une période d'observation de 2,5 s, le calcul (pas de 0,01 s) a requis environ trois heures C.P.U. alors que le même calcul, par le schéma du trapèze (non repris dans ce chapitre) ne pouvait être mené à bien qu'avec un pas de 2,5 millièmes de seconde et nécessitait, déjà après 1,5 s d'observation, environ sept heures CPU sur le même ordinateur. De plus, la solution présentait des oscillations parasites à hautes fréquences. Ces mêmes oscillations apparaissent également sur le premier cas traité (paragraphe 4.2.1) principalement après deux secondes d'observation.

Pour mémoire, le temps de calcul avec le schéma H.H.T., mais pour un pas réduit à 2,5 millièmes de seconde, était d'environ 9 heures CPU pour un temps d'observation de 2,5 s.

Le cas optimal (schéma H.H.T. avec un pas de 0,01 s) correspond à environ 0,18 s par pas et par degré de liberté soit seulement le double de ce qu'on avait relevé précédemment, alors que le pas de temps était quatre fois plus faible.

Les figures 10 à 17 montrent les courbes expérimentales et numériques (H.H.T.; $\alpha = -0,3$; pas de 0,01 s) pour les grandeurs mesurées lors des essais.

Troisième cas LABORELEC : 30 kA, 0,5 s; 105 mm². Courbes expérimentales (traits pleins) et numériques (traits pointillés).

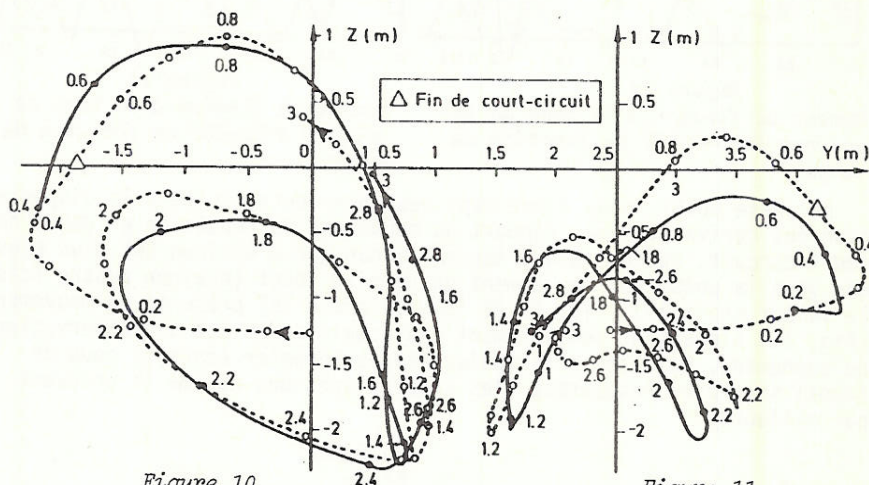


Figure 10
Déplacement de la phase OUEST à mi-portée (plan YZ)

Figure 11
Déplacement de la phase EST à mi-portée (plan YZ).

Nous présentons la figure 11 avec la courbe calculée à la même échelle qu'à la figure 10. Il n'a pas été possible de connaître le facteur d'échelle de la courbe expérimentale correspondante. La figure 11 permet donc de juger l'allure générale uniquement. Les autres figures font apparaître une coïncidence remarquable jusqu'à la fin de l'observation du phénomène. L'amortissement artificiel introduit par voie numérique (HHT, $\alpha = -0,3$) semble proche de la valeur réelle voire même légèrement sous-évalué.

Les oscillations à 100 Hz des courbes expérimentales pendant la durée du court-circuit sont évidemment absentes du modèle mathématique qui ne prenait en compte que la composante continue. L'excellente comparaison essai-calcul nous permet d'avaliser le choix de cette dernière hypothèse.

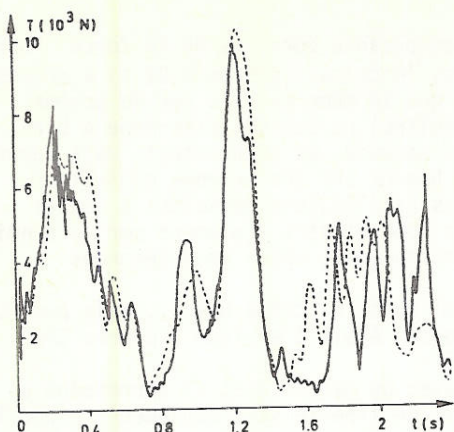


Figure 12

Tension mécanique dans la phase OUEST en fonction du temps.

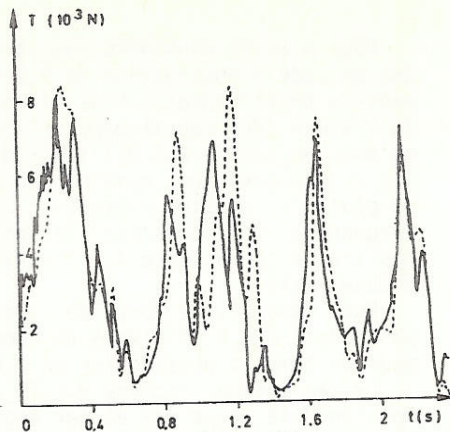


Figure 13

Tension mécanique dans la phase EST en fonction du temps.

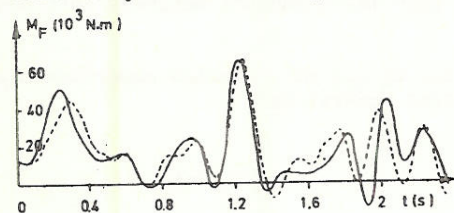


Figure 14

Moment de flexion à la base de la colonne NORD-OUEST en fonction du temps.

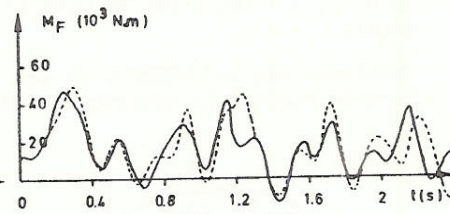


Figure 15

Moment de flexion à la base de la colonne NORD-EST en fonction du temps.

La phase OUEST, plus libre dans ses mouvements, suite à la disposition des dériviatives, par rapport au mouvement de répulsion en début de court-circuit, conduit à une tension mécanique d'environ 20% plus élevée que dans la phase EST au moment du coup de fouet (environ quatre fois la valeur initiale) (fig. 12 et 13). La phase EST présente un mouvement (fig. 11) s'écartant sensiblement des essais après 1,8 s d'observation du phénomène, mais les principales étapes (premier écart et coup de fouet) sont bien respectées, les comparaisons des maxima le prouvent par ailleurs.

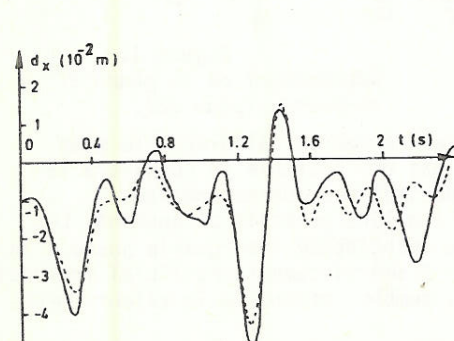


Figure 16

Déplacement, selon X, du point d'ancrage de la phase OUEST, au portique SUD.

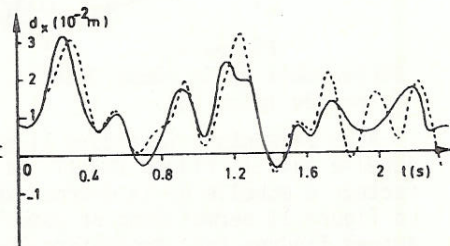


Figure 17

Déplacement, selon X, du point d'ancrage de la phase EST, au portique NORD.

La comparaison expérimentale, que nous venons d'exposer, nous permet d'envisager la solution avec un pas de temps de 10 millièmes des. comme étant l'approche optimale vu d'une part la concordance expérimentale et d'autre part le temps de calcul réduit d'un facteur 3.

4.3. CONFIGURATIONS REELLES

4.3.1. Jeu de barres avec mise sous tension mécanique par un mécanisme à contrepoids (150 kV) [154]

La figure 18 schématise le jeu de barres étudié. Les portiques d'ancrage sont supposés infiniment rigides. La barre de torsion orientée selon l'axe Y est reliée au portique grâce à des paliers et les bras de levier indiqués (de 10 et 32 cm de longueur) assurent la mise sous tension mécanique du jeu de barres par équilibre du couple créé par les contrepoids indiqués sur la figure 18. L'intérêt d'une telle disposition est notamment d'assurer une flèche constante indépendamment de la température extérieure. Elle est utilisée dans plusieurs postes belges, dont Bruegel.

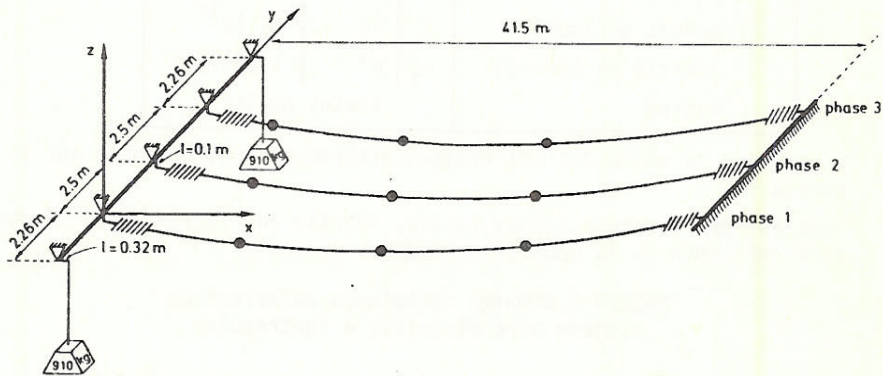


Figure 18

Configuration d'un poste 150kV avec mécanisme à contrepoids

4.3.1.1. Les données du problème.- Les masses concentrées (trois par phase) indiquées sur la figure 18, sont l'image des trapèzes (40 kg chacun) qui permettent d'assurer la liaison électrique vers les appareillages, par sectionneurs pantographes. Chaque phase est constituée d'un faisceau de deux conducteurs que nous remplaçons par un seul câble de section double et de masse uniformément répartie, et ce incluant le poids des entretoises.

Les caractéristiques du câble, des armements et de l'axe du mécanisme (tube) sont repris au tableau 5, celles du court-circuit au tableau 6, pour les deux cas de court-circuit que nous étudierons.

Grandeurs	Symb./unit.		Valeurs
a) câble (cuivre)			
section	A	m ²	634 10 ⁻⁶
module d'élasticité	E	Pa	11,2 10 ¹⁰
coef. de dilatation thermique linéaire	α	°C ⁻¹	16,4 10 ⁻⁶
masse volumique	ρ	Kg/m ³	9970*
poids par unité de longueur	p	N/m	62
autres	identiques au tabl. 1		
b) chaînes d'ancrage			
rigidité extens. (supputée)	EA _{ch}	N	70 10 ⁶
poids par unité de longueur	p _{ch}	N/m	310
longueur	ℓ _{ch}	m	1,85
c) tube de torsion (Acier)			
section	A	m ²	1,72 10 ⁻³
module de Young	E	Pa	21 10 ¹⁰
inertie en torsion	I _t	m ⁴	1,64 10 ⁻⁶
autres	toutes nulles**		

* ρ comprend la masse des entretoises distribuées uniformément sur la portée

** les autres caractéristiques (masse, inertie en flexion, etc...) sont sans influence vu la géométrie étudiée.

TABLEAU 5. Données mécaniques relatives au système avec mécanisme à contrepoids

Grandeurs	Symb./unit.		Valeurs	
			premier cas	deuxième cas
Valeur efficace du courant	I _{eff}	A	40000	35000
Valeur de lère crête	I _{1cr}	A	asym.max. (φ = -82,2°)	asym.max. (φ = -85,4°)
Durée	t _{c-c}	s	0,6	0,4
Constante de temps équivalente	τ	s	0,1	0,05

TABLEAU 6. Données électriques relatives au système avec mécanisme à contrepoids (défaut biphasé-isolé)

4.3.1.2. Les conditions initiales étaient les suivantes :
 tension mécaniques : 19620 N par phase
 flèche correspondante : 1,2 m

On remarquera que pour l'équilibre avec le contrepoids, il convient

de connaître l'orientation des divers bras de levier, car, pour une même valeur de la masse du contrepois, il y correspond différentes flèches du jeu de barres selon cette orientation, alors que la tension reste constante. En fait, la définition de l'orientation fixe la longueur non déformée du câble.

4.3.1.3. Choix de la discrétisation.- Les bras de levier sont discrétisés par un type particulier d'élément fini permettant d'introduire les contraintes non-linéaires associées [ce type d'élément est décrit au chapitre 2, paragraphe 2.2]. La discrétisation porte également sur la phase 3 qui participe aussi à la réponse globale, par sa liaison avec le mécanisme en question.

La discrétisation comprenait 33 éléments de câble (du deuxième degré) 4 éléments de poutre (tube) et 5 éléments pour le "mécanisme". En tout 70 noeuds et 195 degrés de liberté.

4.3.1.4. Calcul de la position de référence.- La position de référence du modèle correspondait à une tension mécanique d'environ 20000 N par phase et des flèches respectivement de 1,22 m (phase 1); 1,21 m (phase 2) et 1,20 m (phase 3) [flèches à mi-portée].

La dissymétrie des flèches est liée à la présence des trapèzes situés différemment sur chacune des trois phases.

4.3.1.5. Réponse dynamique transitoire.- Ce calcul a été réalisé par le schéma d'intégration du trapèze ($\beta=0,25; \gamma=0,5$) avec remise à jour des raideurs une fois par pas de temps de cinq millièmes de seconde. La fonction spatiale de la force électromagnétique était remise à jour tous les dix pas. L'étude portait sur un temps d'observation d'environ 2,4 s. Le calcul effectué sur IBM 370/158 a nécessité 2h28 minutes CPU soit environ $8,3 \cdot 10^{-2}$ secondes par pas et par degré de liberté. Les figures 19 et 20 montrent l'évolution des déviations des câbles en défaut, à mi-portée et pour les deux cas de court-circuit, tout en respectant les échelles et la distance entre phases.

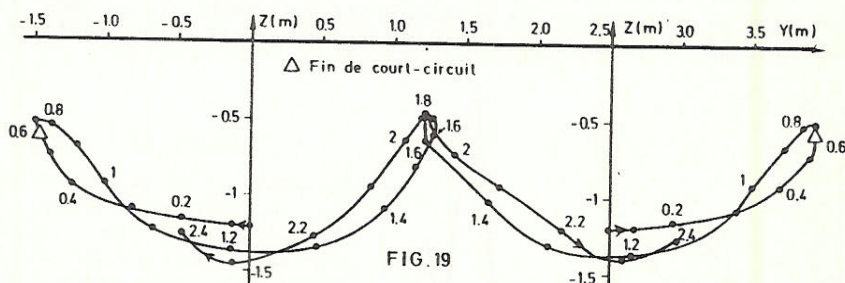


FIG. 19

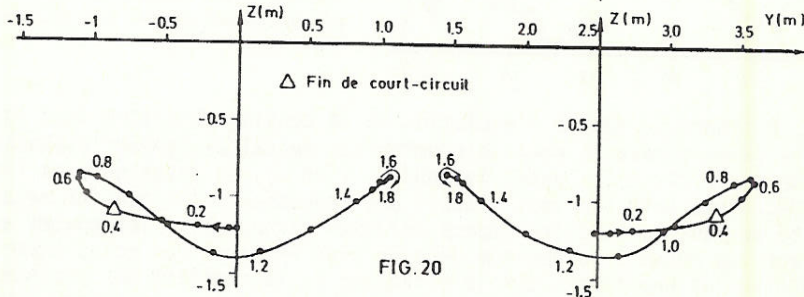


FIG. 20

Figure 19

Premier calcul : 40 kA; 0,6s

Figure 20

Deuxième calcul : 35 kA; 0,4s

L'allure du mouvement est pendulaire. Elle est principalement liée à l'importance des masses des trapèzes et au "mou" donné au câble par la rotation de la barre de torsion (d'environ soixante degrés), ce qui diminue d'environ neuf centimètres la longueur de la portée et accroît donc la flèche.

Il s'ensuit une oscillation forcée du tube avec une période d'environ 1,2 secondes. Le tube qui travaille en torsion subit principalement une rotation d'ensemble et on n'observe que de faibles contraintes de cisaillement (de l'ordre de 100 MPa (11kg/mm^2) selon le critère de TRESCA). Les barrettes qui correspondent physiquement au bras de levier du modèle subissent des débattements verticaux de l'ordre de quatre centimètres ce qui annule la possibilité de choc avec le portique d'ancrage et rend fiable les informations données par le calcul.

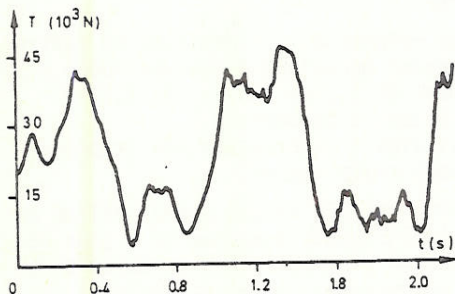


Figure 21

Evolution de la tension mécanique en fonction du temps dans la phase 1, pour le premier cas de calcul (40kA; 0,6s.)

La figure 21 montre l'évolution de la tension dans un des deux câbles en défaut dans le premier cas de court-circuit (40 kA; 0,6 s). Il est remarquable de constater que le premier maximum (vers environ 0,4 seconde) ne correspond pas du tout à la position extrême du câble dans la direction Y (visible à la fig. 19) qui se produit vers 0,7 s.

En effet, cette position extrême du câble coïncide cette fois avec le début de la retombée. Ce phénomène est évidemment lié au "mou" donné au câble par le mécanisme et à la période de débattement pendulaire.

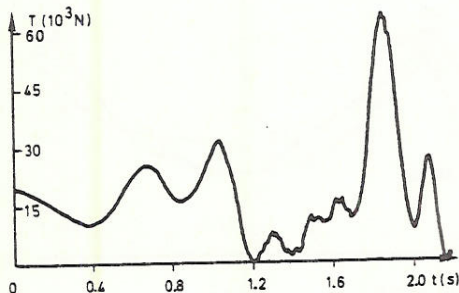


Figure 22

Evolution de la tension mécanique, en fonction du temps, dans la phase 3 (phase "saine") pour le premier cas de calcul (40kA; 0,6s, court-circuit biphasé isolé entre les phases 1 et 2).

La figure 22 montre l'évolution de la tension mécanique dans la phase saine (phase 3) pour le premier cas de calcul (défaut biphasé-isolé de 40 kA; 0,6 s entre les phases 1 et 2). La rotation dans l'axe du mécanisme entraîne tout d'abord une réduction de la tension mécanique suite au sens de rotation imposé par les efforts créés sur les phases en défaut. La phase 3 se déplace dans un plan vertical (du moins numériquement, vu les hypothèses sur le mécanisme et la rigidité des ancrages). Des coups de fouet successifs apparaissent sur cette phase, ils finissent par conduire à une tension mécanique plus importante que sur les phases en défaut (vers 1,9 s.), ce qui était imprévisible.

On atteint un maximum d'environ 3,3 fois la valeur initiale. Si nous discutons les figures 20 et 21 d'un point de vue électrique, le rapprochement des phases est inadmissible dans le premier cas et à la limite du tolérable dans le second. En effet la distance d'isolement pour tenir la tension électrique maximale entre phases à ce niveau de tension (poste du réseau 150 kV) est de 35 centimètres environ.

Le premier cas de court-circuit est relatif à un défaut poste, ce qui implique une disjonction totale du poste auquel cas le jeu de barres n'est plus sous tension électrique après élimination du défaut. Le deuxième cas de court-circuit est relatif, par exemple, à un défaut sur une ligne reliée au poste et un déclenchement au second stade (d'où les 0,4 s.) du relais du poste situé sur la ligne en défaut. Les 5 kA d'écart entre deux cas correspondent à l'apport de la ligne au court-circuit. Dans ce cas, le poste reste sous tension après élimination du défaut.

Compte tenu de ces considérations on peut dire que le poste peut supporter mécaniquement et électriquement les contraintes auxquelles il est susceptible d'être soumis vu sa situation dans le réseau.

Néanmoins, nous sommes à la limite du tolérable et une augmentation du niveau de court-circuit entraînerait obligatoirement un aménagement en conséquence.

Enfin, il est intéressant de constater que pour un apport d'énergie environ deux fois plus faible, on gagne des facteurs de l'ordre de 1,3 à 1,5 sur les tensions mécaniques et les débattements du câble.

4.3.2. Poste 400 kV d'Electricité de France [162-163-168]

Les postes haute tension 400 kV EDF sont actuellement dimensionnés pour résister aux efforts, devenus prépondérants, créés par des intensités de courant de court-circuit de 63 kA. La figure 23 indique la configuration étudiée et la trajectoire du courant. Les portiques sont supposés infiniment rigides et le faisceau de deux conducteurs est remplacé par un seul câble, comme dans le cas précédent.

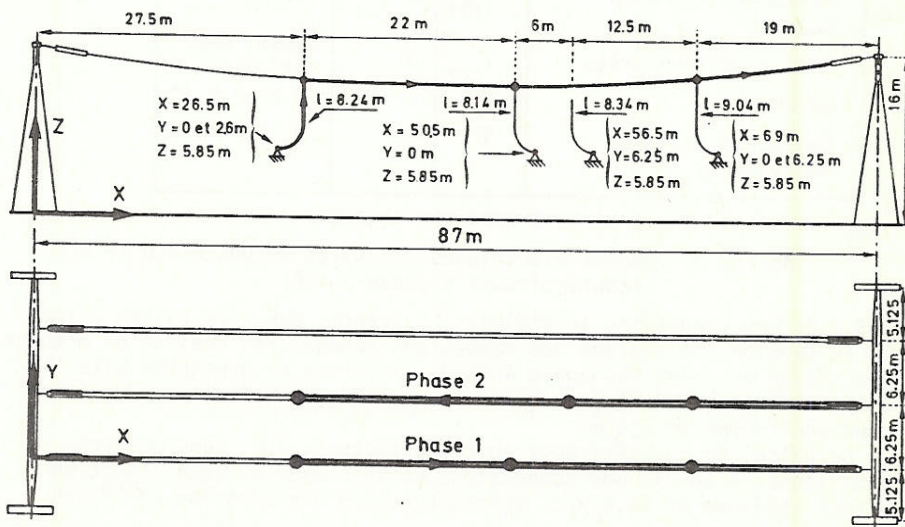


Figure 23

Configuration d'un poste 400kV E.D.F. La trajectoire du courant de court-circuit est indiquée en trait renforcé.

4.3.2.1. Les données du problème.- Les données sont reprises aux tableaux 7 et 8.

Grandeur	Symb./unit.		Valeurs
a) câble (ASTER)			
section	A	m ²	1140. 10 ⁻⁶
module d'élasticité	E	Pa	5,4 10 ¹⁰
coef. de dilatation thermique linéaire	α	°C ⁻¹	23.1 10 ⁻⁶
masse volumique	ρ	Kg/m ³	2761.
poids par unité de longueur	p	N/m	30,9
chaleur spécifique massique	C _m	J/Kg°C	898
résistivité à 20°	Ω_0	$\Omega \times m$	0,328 10 ⁻⁷
charge de rupture		N	150000.
b) armement			
rigidité extension.	E _{Ach}	N	2,4 10 ⁷
poids par unité de longueur	P _{ch}	N/m	692.
longueur	l _{ch}	m	4,64

TABLEAU 7. Données mécaniques relatives au poste 400 kV EDF

Grandeur	Symb./unit.		Valeurs
Valeur efficace du courant	I _{eff}	A	63000
Valeur de lère crête	I _{lcr}	A	asym. max. ≈171000.
Durée	t _{c-c}	s	0,2 et 0,5*
Constante de temps équivalente	T	s	0,120

*deux durées de court-circuit sont envisagées

TABLEAU 8. Données électriques relatives au poste 400 kV EDF (court-circuit biphasé-isolé)

4.3.2.2. Les conditions initiales.- En France, dans les postes à très haute tension, le réglage des connexions tendues est réalisé en prenant une flèche au point bas égale à 3% de la portée en hypothèse dite "E", c'est-à-dire à 45°C et sans vent. Compte tenu de la portée il y correspond une flèche de 2,6 m.

Le calcul de court-circuit doit s'effectuer, lui, dans d'autres conditions, à savoir une température de 15°C avec un vent créant un effort linéique de 44,6 N/m, correspondant à une pression de 720 Pa.

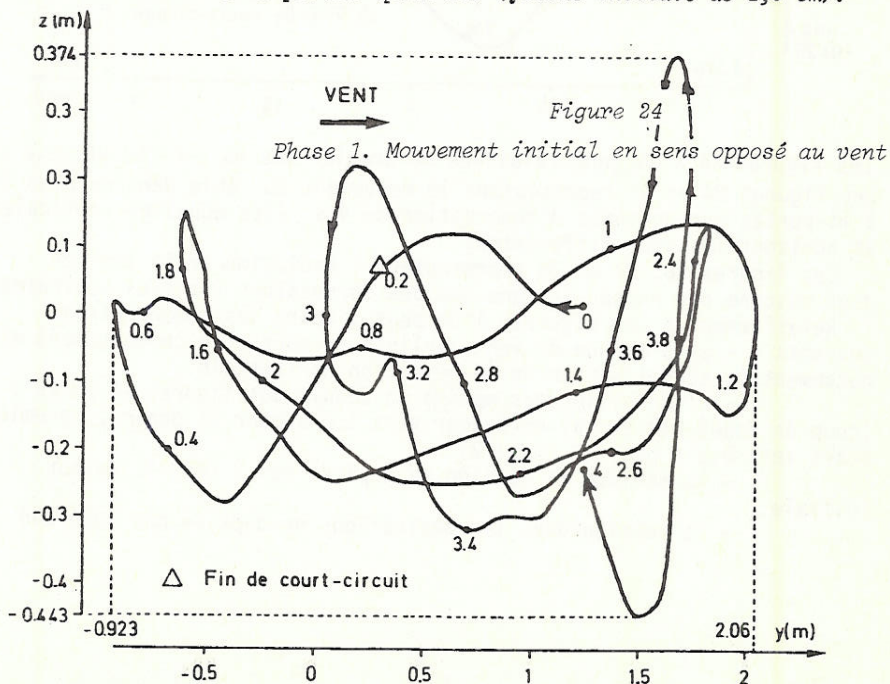
4.3.2.3. Choix de la discrétisation.- La discrétisation comportait 42 éléments câbles (deuxième degré) soit 228 degrés de liberté. Chacune des trois dérivations par phase est discrétisée en deux éléments.

4.3.2.4. Calcul de la position de référence du modèle.- Compte tenu des conditions initiales le calcul s'est effectué en deux étapes : la recherche de la position de réglage à 45°C sans vent et ensuite la position de référence proprement dite à 15°C avec vent. Le premier calcul sert à déterminer la longueur non déformée du câble. Il y correspond pour une flèche de 2,6 m une tension de 18700 N par phase qui peut se décomposer en un effort vertical de 4800 N et un effort longitudinal de 18300 N. Il est intéressant de constater que le même calcul effectué en remplaçant les dériviatives par des masses concentrées conduit à un écart de 7%. Le deuxième calcul conduit finalement à une tension de 36000 N qui peut se décomposer en un effort vertical de 5960 N, un effort horizontal de 2040 N et un effort longitudinal de 35800 N. La flèche dans le plan du câble reste quasi identique au cas précédent c'est-à-dire qu'il y a compensation entre l'élongation liée à l'écart de température (négative) et celle liée à l'augmentation de la tension dans le câble (positive).

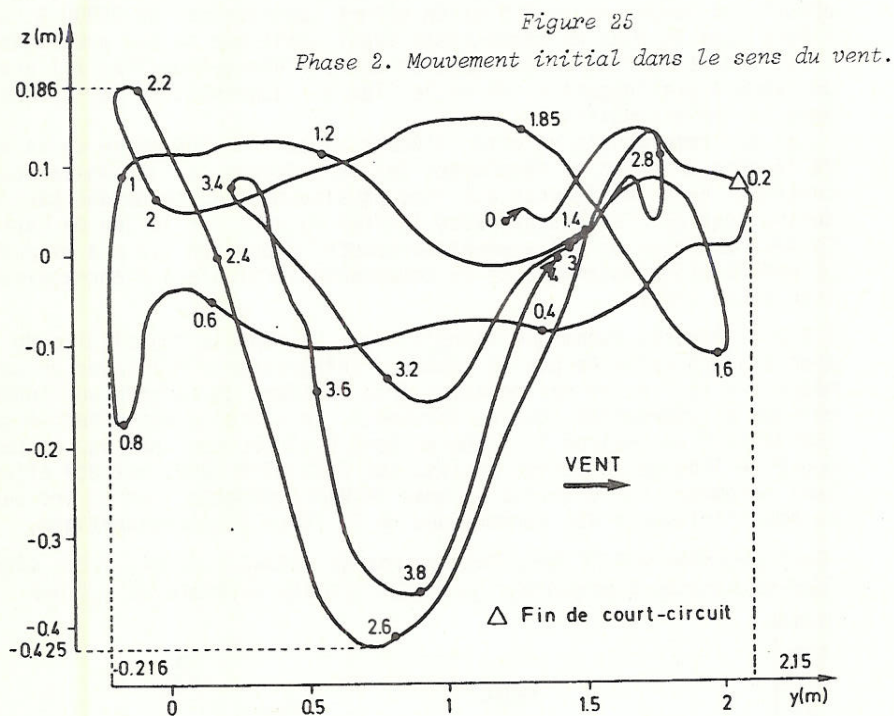
Il est remarquable de citer l'écart, d'environ 30%, entre ce calcul et le même effectué en remplaçant les dériviatives par des masses concentrées. Cette différence est liée physiquement au haubanage par les dériviatives qui se tendent, sous l'effet du vent sur le jeu de barres. Ce vent provoque un déplacement horizontal d'environ 1,3 m à mi-portée. La modification, notamment de la composante verticale à l'ancrage, est liée à ces effets.

4.3.2.5. Réponse dynamique transitoire.- La réponse transitoire du modèle a été calculée par le schéma d'intégration H.H.T. avec un paramètre $\alpha = -0,3$ et un pas de temps d'un centième de seconde sur toute la période d'observation (quatre secondes). Ce calcul a été effectué sur IBM 370/158 en environ 3,25 heures soit 0,13 seconde par pas et par degré de liberté. D'autres essais, sur DECSYSTEM 2050, ont été effectués notamment sur d'autres schémas (HOUBOLT, NEWMARK) et en incluant ou non l'influence des harmoniques de la force électromagnétique.

Configuration 400 kV EDF. Premier cas de calcul : 63 kA; 0,2s. Allure des mouvements à mi-portée (plan YZ) (flèche initiale de 2,6 cm).



Le temps de calcul est quasi identique sur les deux machines pour un cas identique, ce qui permet la comparaison. Le schéma de HOUBOLT requerrait environ 50% de temps supplémentaire et obtenait des valeurs légèrement supérieures (cinq à dix pour cent au maximum). Enfin, NEUMARK (sous la forme du trapèze) ne présente à nouveau guère d'intérêt car il exige un pas plus faible et conduit à des temps nettement prohibitifs. Par ailleurs, l'influence de la prise en compte des harmoniques de la force exige le choix d'un pas de temps nettement plus faible pendant la durée du court-circuit, ce qui a une incidence très sensible sur le temps de calcul pour obtenir, en définitive, des résultats très similaires.



Les figures 24 à 29 sont relatives au premier cas de c-c (63 kA; 0,2 s). Les figures 24 et 25 représentent le mouvement du câble dans un plan YZ à mi-portée sur un temps d'observation de 4 s. (les échelles verticales et horizontales sont différentes).

Les figures 26, 27 et 28 représentent l'évolution de la tension dans chacune des phases et dans une des dérivations (la plus contrainte).

Relativement à ces figures, l'on peut y faire les commentaires suivants : - La présence du vent explique en partie le comportement et notamment la stabilisation de la déviation horizontale.

- L'apparition des maxima se déduit des figures 24 et 25 : (coup de fouet horizontal en retour vers 1,2 s pour la phase 1, premier écart vers 0,2 s pour la phase 2)

- le maximum de tension ne dépasse pas 3 fois la valeur initiale.

- la tension dans les dérivations ne dépasse pas 1000 daN

Evolution de grandeurs en fonction du temps

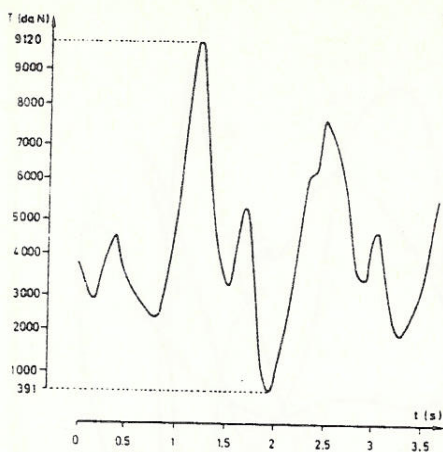


Figure 26
Tension mécanique dans la phase 1,
au niveau d'un ancrage

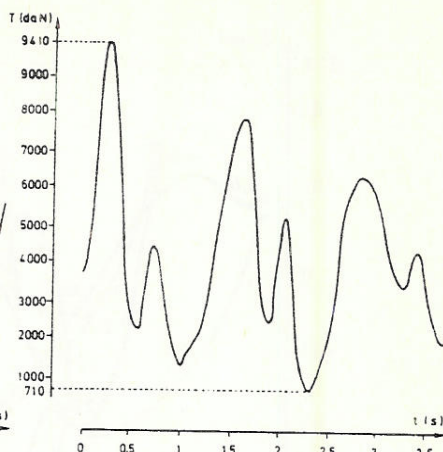


Figure 27
Tension mécanique dans la phase 2,
au niveau d'un ancrage

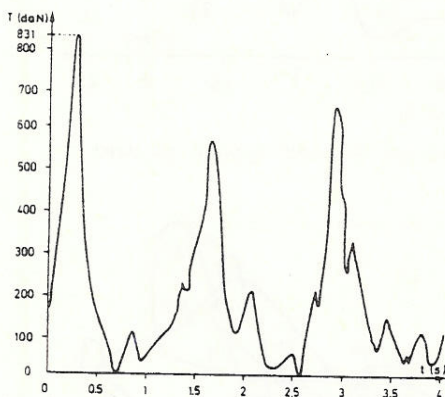


Figure 28
Tension mécanique dans une dériva-
tion de la phase 2.

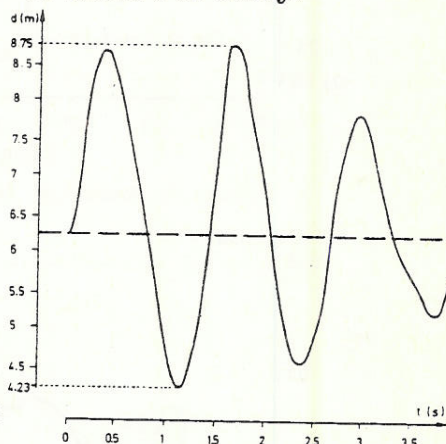


Figure 29
Distance minimum entre phases

- le rapprochement entre phases (fig. 29) montre une distance minimale de 4,23 m vers 1,2 s. Cet écartement est fortement et favorablement influencé par la présence des dérives.

Les fig. 30 à 35 sont relatives au deuxième cas de court-circuit (63 kA, 0,5 s), toutes autres choses restant égales.

L'énergie apportée au câble, et proportionnelle à $I^2 \cdot t_{cc}$, est multipliée par 2,5 par rapport au cas précédent.

Les fig. 30 et 31 sont les plus parlantes pour montrer l'influence de la durée du court-circuit (par rapport aux fig. 24 et 25 du cas précédent).

Fig. 30 : le câble est davantage repoussé horizontalement (-1,77 m contre -0,92 précédemment) ce qui conduit à un choc en retour amplifié (+2,4m contre 2,06m antérieurement vers 1,2 s) et à des contraintes plus élevées comme on le verra plus loin. On retrouve l'allure générale du cas précédent avec amplification verticale sur la fin du mouvement.

Configuration 400 kV EDF. Deuxième cas de calcul : 63 kA; 0,5s. Allure des débattements à mi-portée (plan YZ).

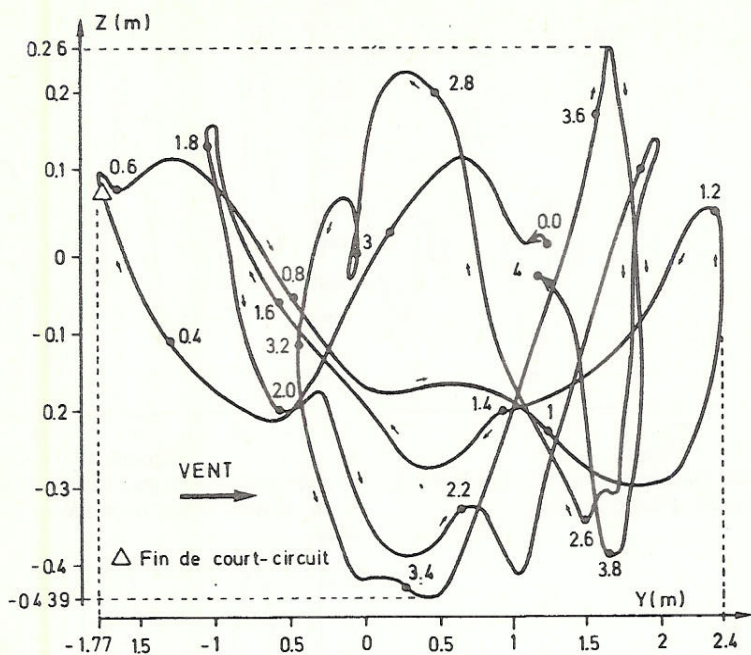


Figure 30

Phase 1. Mouvement initial en sens opposé au vent

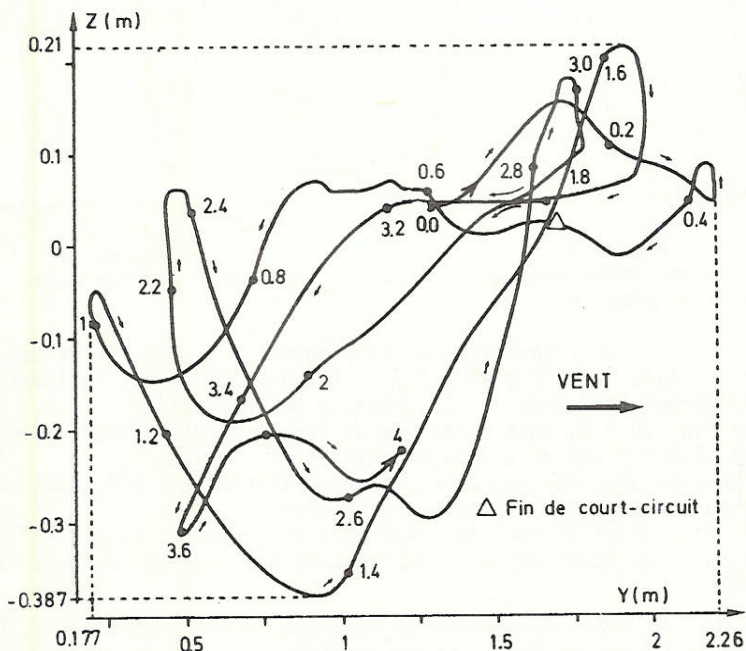


Figure 31

Phase 2. Mouvement initial dans le sens du vent.
Evolution de grandeurs en fonction du temps.

Fig. 31 : le câble subit également un effort prolongé qui tend à l'empêcher d'agir comme précédemment (boucle à l'extrême droite). Cette répulsion (+2,26 m contre 2,15 m) induit également des contraintes plus importantes vers 0,3 s. mais cette gêne détruit la similitude des mouvements avec le cas précédent (durée de 0,2 s) et limite les autres débattements qui restent inférieurs à ceux observés dans le cas à 0,2 s.

Evolution de grandeurs en fonction du temps

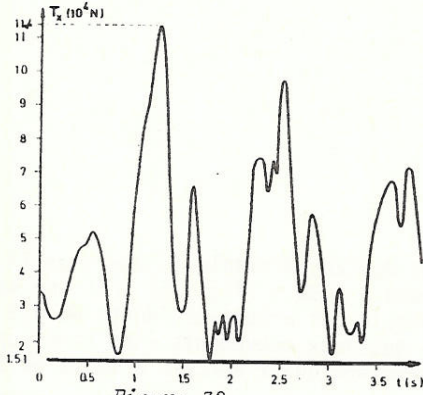


Figure 32

Tension mécanique dans la phase 1, au niveau d'un ancrage

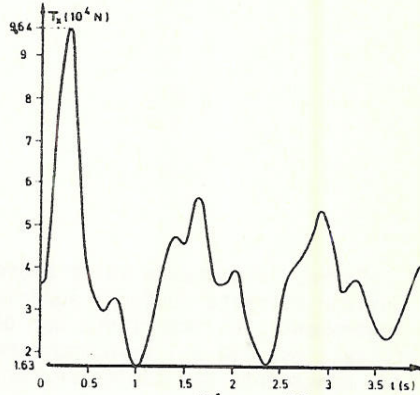


Figure 33

Tension mécanique dans la phase 2, au niveau d'un ancrage.

Compte tenu de l'amplification des mouvements horizontaux de répulsion (pendant le court-circuit et peu de temps après), les efforts dans les dérivationes sont plus élevés que précédemment.

On atteint même un facteur d'amplification des contraintes de 3,2 par rapport au cas précédent (en comparant les figures 28 et 34), ce qui porte l'effort à l'ancrage à environ 2000 daN en direction verticale et 1000 daN en direction horizontale.

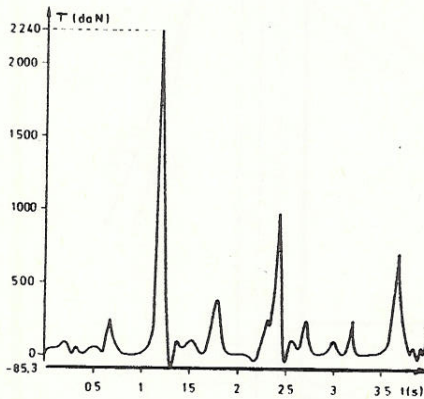


Figure 34

Tension mécanique dans une dérivation de la phase 1.

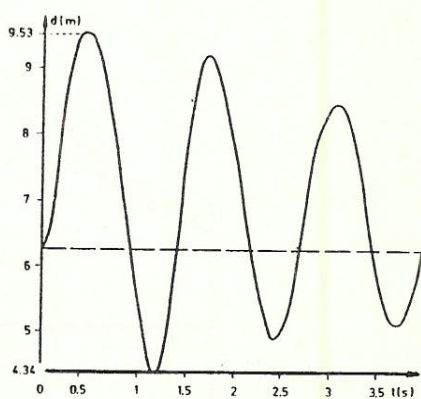


Figure 35

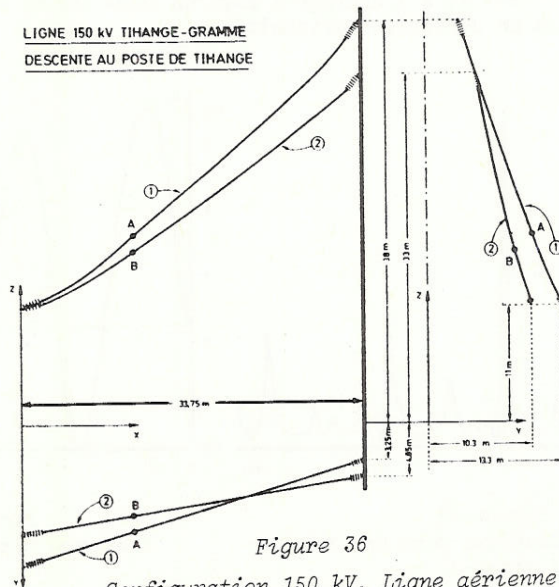
Distance minimum entre phases

Le tableau 9 reprend quelques facteurs d'amplification significatifs, en fonction de l'augmentation de la durée du court-circuit (de 0,2 à 0,5 s).

TABLEAU 9. Voir page suivante

Enfin, la distance entre phases devient minimale à l'abscisse 44 m environ et reste toujours supérieure à 4,34 m (fig. 35) soit une valeur légèrement plus importante que dans le cas précédent (durée de 0,2 s). Ce fait est lié à l'asynchronisme des deux mouvements (les enveloppes des mouvements des câbles se rapprochent quant à elles à moins de 3,7 m).

4.3.3. Descente d'un terme vers un poste 150 kV (30 kA; 0,4 s) [167]
 Le comportement de cette configuration a été étudié dans le cas particulier de la ligne belge 150 kV reliant Tihange à Gramme, côté Tihange. La figure 36 en donne une vue en trois projections (on passe d'une disposition en drapeau, au pylône, à une disposition en nappe, au portique d'ancrage). Les deux ancrages sont supposés infiniment rigides.



Configuration 150 kV. Ligne aérienne
 Descente au poste de Tihange. Seules les 2 phases en défaut sont
 représentées.
 A et B sont les deux points entre lesquels la distance est minimum

	direction →	Réactions aux portiques d'ancrages			Réactions aux ancrages des dérivations			Tens. mécan. ds. le jeu de barres
		X	Y	Z	X	Y	Z	
court-circuit de 0,2 s par rapport aux valeurs statistiques initiales	valeur	2,63	5,6	2,58				2,58 Phase 2 0,25
	situation instant (s)	Phase 1 1,2	Phase 2 0,25	Phase 1 3,6	très grands*			
court-circuit de 0,5 s par rapport aux valeurs statistiques initiales	valeur	3,18	9,25	2,95				3,2 Phase 1 1,2
	situation instant (s)	Phase 1 1,2	Phase 1 1,2	Phase 1 1,6	très grands*			
court-circuit de 0,5 s par rapport au court-circuit de 0,2 s.	valeur	1,2	2,0	1,14	2,1	3,5	3,15	1,26 Phase 1
	situation	Phase 1	Phase 1	Phase 1	Phase 1	Phase 1	Phase 1	
Rappel des valeurs à la position de référence statique (daN)		3580	200	600	très faibles*			3600

* Nous n'avons pas indiqué ces valeurs car elles ne sont pas significatives. Seule la valeur maximale est intéressante et nous l'avons citée dans le texte.

TABLEAU 9. Poste 400 KV EDF. Intensité de court-circuit : 63 KA.
Facteurs d'amplification maxima entre des durées de court-circuit de 0,2 s. et 0,5 s.

4.3.3.1. Les données du problème.- Elles sont reprises aux tableaux 10 et 11 (i)

Grandeur	Symb./unit.		Valeurs
a) câble (AMS-Acier)	A	m ²	593,5 10 ⁻⁶
section			
module d'élasticité	E	Pa	7,3 10 ¹⁰
coef. de dilatation thermique linéaire	α	°C ⁻¹	19,7 10 ⁻⁶
masse volumique	ρ	Kg/m ³	3470.
poids par unité de longueur	p	N/m	20,2
résistivité à 20°	Ω_0	$\Omega \times m$	0,38 10 ⁻⁷
b) armement			
rigidité en ext. (supposée)	EA _{ch}	N	40 10 ⁶
poids par unité de longueur	p _{ch}	N/m	461.
longueur	l _{ch}	m	2,3

TABLEAU 10. Données mécaniques relatives à la descente au poste de Tihange (150 kV)

Grandeur	Symb.	unités	Valeurs
Valeur efficace du courant	I _{eff}	A	30000.
Valeur de lère crête	I _{lcr}	A	asymétrie maximale
Durée	t _{c-c}	s	0,4
Constante de temps équivalente	τ	s	0,100

TABLEAU 11. Données électriques relatives à la descente au poste de Tihange (150 kV) (court-circuit biphasé isolé)

La valeur de l'intensité pour laquelle le calcul a été fait correspond à une valeur supérieure à celle actuellement prévisible (20 kA). Ce calcul peut constituer en quelque sorte une anticipation à moyen terme.

4.3.3.2. Les conditions initiales.- La tension mécanique horizontale est d'environ 2490 N à 15°C, sans vent. On suppose que le court-circuit se produit dans ces conditions.

(i) Ces données nous ont aimablement été fournies par le Bureau d'Etudes Electrobél

4.3.3.3. Choix de la discrétisation.- La discrétisation comprenait 18 éléments câbles (du deuxième degré) soit 34 noeuds et 90 degrés de liberté.

4.3.3.4. Calcul de la position de référence.- Compte tenu de la dénivellation importante de la portée, le générateur des données PRELEC (annexe 1) préfère considérer chaque phase comme définie par sa longueur plutôt que par la tension horizontale. La longueur est corrigée itérativement, par incrément de température pour obtenir la valeur demandée de 2490 N.

4.3.3.5. Réponse dynamique transitoire.- Pour rappel plusieurs calculs ont été effectués sur ce cas au chapitre 3, paragraphe 3.3. Les résultats présentés dans ce chapitre sont relatifs au calcul par le schéma d'intégration du trapèze avec remise à jour de Newton-Raphson à chaque itération et un pas de temps de 5 millièmes de seconde.

Le calcul a requis 4 heures et 11 minutes CPU pour un temps d'observation du phénomène de 2,5 secondes soit 0,148 seconde par pas et par degré de liberté. (une autre méthode avait conduit à 0,10 seconde par pas et par degré de liberté).

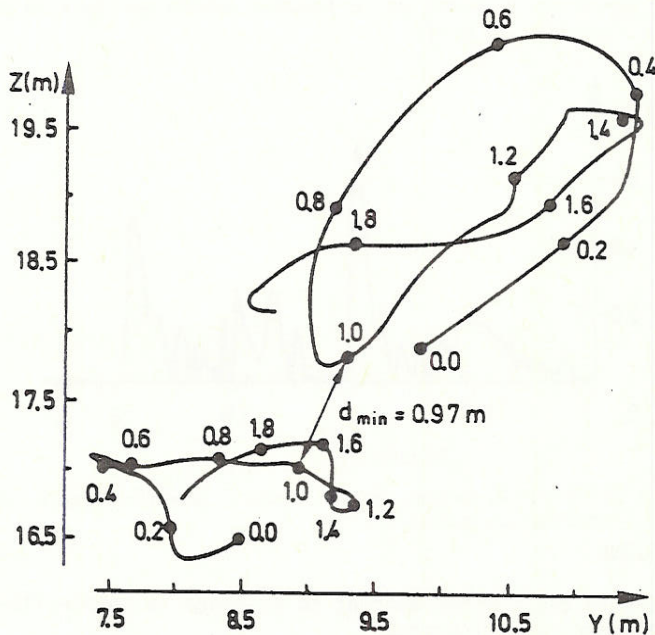


Figure 37

Configuration 150 kV. Ligne aérienne

Allure des mouvements (plan YZ) des points A et B repérés à la fig. 36.

La figure 37 trace l'évolution dans le plan YZ des points se rapprochant le plus (dénommés A et B sur la figure 36).

Les figures 38 et 39 montrent l'évolution de la tension dans chaque phase.

- La disposition gauche des câbles explique le comportement différent des deux phases et notamment l'importance du coup de fouet sur la phase supérieure

- La tension mécanique atteint par rapport à la valeur initiale un facteur d'amplification de 24 pour la phase 1 (figure 39) et de 8 pour la phase 2 (figure 38)

Les conséquences pour les structures d'ancrages peuvent être dangereuses notamment la torsion du pylône si le mouvement n'est pas synchrone avec la terre adjacente.

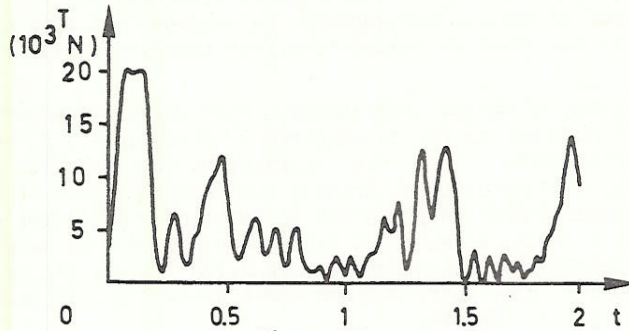


Figure 38

Evolution en fonction du temps de la tension mécanique dans la phase 2 au niveau de l'ancrage au poste.

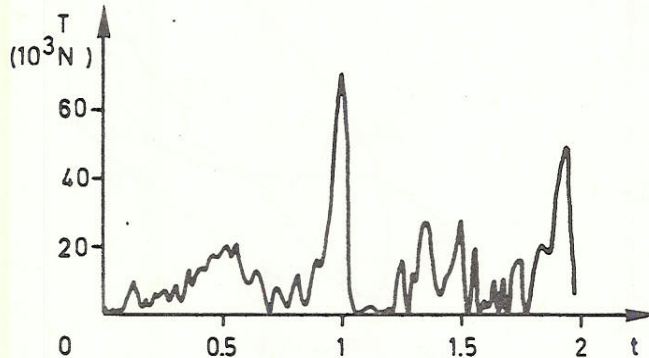


Figure 39

Evolution, en fonction du temps, de la tension mécanique dans la phase 1 au niveau de l'ancrage au poste.

4.4. CONCLUSIONS

Les différents cas traités mettent en évidence la complexité de ce phénomène fortement non linéaire.

Toute extrapolation est dangereuse et chaque cas est un cas d'espèce.

Il apparaît nécessaire de tenir compte dans les calculs de tous les paramètres importants cités au chapitre 2 (température, rigidité des portiques, élasticité des câbles, présence des dérivations, du vent, de la gravité, etc...).

Un calcul dynamique transitoire s'impose car les efforts maxima arrivent bien souvent après élimination du court-circuit et leur origine est liée plus directement aux forces élastiques et d'inertie qu'aux forces électromagnétiques qui initialisent le processus. L'effet du vent peut être favorable de même que la présence de dérivations placées vers le centre des portées.

Les efforts apparaissant dans les dérivationset leurs ancrages peuvent atteindre des valeurs élevées (2000 daN à 63 kA dans le cas traité) et les efforts sur le jeu de barreset leurs ancrages peuvent atteindre des valeurs considérables, notamment dans les dispositions en drapeaux. On a atteint 20 fois la valeur initiale dans un cas particulier, au niveau 30 kA.

La méthode utilisée a été comparée avec les résultats expérimentaux obtenus lors d'essais en vraies grandeurs effectués à Laborelec (Laboratoire Belge de l'Industrie Electrique) et les résultats obtenus montrent une concordance remarquable tant du point de vue des valeurs maximales que de l'évolution temporelle (environ 10%).

En conséquence nous pouvons dire que cet outil de calcul permet de donner une confiance réaliste aux résultats numériques obtenus dans les configurations étudiées étant entendu que les données du problème doivent être déterminées avec suffisamment de soins.

